



**Universidade
de Aveiro
Ano 2017**

Departamento de Engenharia Mecânica

**José António
Oliveira Ferreira**

Cálculo de tempos e custos de maquinagem



**Universidade
de Aveiro
Ano 2017**

Departamento de Engenharia Mecânica

**José António Oliveira
Ferreira**

Cálculo de tempos e custos de maquinaria

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor João Paulo Davim, Associado C/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho à Letícia.

o júri

presidente

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Francisco José Gomes da Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Associado C/ Agregação, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Desde já agradeço ao Professor Doutor João Paulo Davim e ao Mestre António Festas pelo apoio e orientação dados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Às empresas que disponibilizaram orçamentos que neste trabalho são denominadas, por empresa A, B e C.

Agradeço aos meus colegas de curso e aos amigos que fiz no Departamento de Física.

Aos amigos que fiz nas residências que me acompanharam ao longo deste percurso.

À minha família pela paciência e por todo o apoio que me deram.

Aos meus grandes amigos Gil e Tiago, que sempre estiveram do meu lado e que merecem destaque.

E por fim, a todos aqueles que fazem parte da minha vida.

palavras-chave

CNC, CAM, estimativa de custos, maquinagem, tempo de maquinagem, custo de maquinagem

resumo

Este trabalho analisa os diferentes modelos que possibilitam a realização de um orçamento para peças maquinadas e salienta as variáveis que terão influência decisiva nesse processo como, por exemplo, o fator tempo, a complexidade geométrica e a rugosidade da peça. As operações do processo em questão são a fresagem, o torneamento e a furação.

Através da revisão bibliográfica, entende-se o que é um custo, o papel de diferentes métodos de custo, assim como a informação necessária, para se criar um orçamento. Esta revisão aborda a maquinagem a um nível económico e como a introdução de tecnologias mais avançadas, permite otimizar o tempo de maquinagem.

A metodologia desenvolvida foca-se na criação de relações entre os parâmetros de corte para as diferentes operação e o custo, parâmetros estes obtidos pela associação de geometria base-operação-ferramenta-máquina-ferramenta.

De forma a testar a metodologia, criaram-se dois casos de estudo, uma peça cilíndrica e outra prismática, para ser possível abordar as operações em questão. Orçamentos para estas peças foram solicitados a empresas externas, para avaliar o custo obtido teoricamente, com orçamentos propostos a outras empresas.

Neste trabalho, concluiu-se que os sistemas CNC aumentam a eficiência da maquinagem, porque reduzem os tempos improdutivos das operações. O aumento das peças a fabricar, faz com que o custo e o tempo de fabrico por peça, tendam para um valor constante. E, por fim, conclui-se que uma estimativa precisa (orçamento), permite que uma empresa seja mais competitiva e mais eficiente, nas decisões tomadas nas fases iniciais de planeamento de produção.

keywords

CNC, CAM, cost estimating, machining, machining time, machining cost

abstract

This work analyzes the different models that allow the realization of a budget for machined parts and emphasizes the variables that will have decisive influence in this process as for example the time factor, the geometric complexity and the parts roughness. The operations of the process in question are milling, turning and drilling.

Through bibliographic review, it is understood what a cost is, the role of different cost methods and the necessary information to create a budget. This review discusses machining as an introduction of more advanced technologies to optimize machining time (CNC).

A develop, methodology focuses on the creation of relations between the cut parameter for the different operations and the cost. These parameters are obtained by the association of geometrical feature-operation-tool-machine-tool. In order to test the methodology, two case studies were created, one cylindrical and another prismatic, to approach the operations. Budgets for these parts were requested from external companies, to evaluate the theoretically results. In this work it was concluded that CNC systems increase the efficiency of the use of the machine tool. The increase of the parts to be manufactured, makes the cost and the time of manufacture per part, tend to a constant value. Finally, it is concluded that a precise estimate (budget) allows a company to be more competitive and more efficient regarding in the decisions taken in the initial stages of production planning.

Índice

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	ii
Simbologia	iii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura do trabalho	2
2. Cálculo de custos de maquinagem	3
2.1. Custo	3
2.2. Métodos de Estimativa	5
2.3. Dados necessários para realizar um orçamento	7
3. Metodologia	17
3.1. Formulação do problema	17
3.2. Relações dos parâmetros de maquinagem com o custo	18
3.3. Informação necessária para o sistema que avalia os custos	22
4. Casos de estudo	25
4.1. Caracterização dos casos de estudo	25
5. Análise e Discussão de resultados	37
5.1. Análise de tempo de maquinagem	37
5.2. Análise de custo de maquinagem	41
5.3. Análise de orçamentos de empresas	45
6. Conclusões e trabalho futuro	49
Referências	51
Anexos	54

Lista de Figuras

Figura 1: Setores de uma empresa (Adaptado de Rajkumar 2011)	3
Figura 2: Influencia dos diferentes departamentos de uma empresa nos custos futuros de um produto (Adaptado de Souchoroukov, 2004)	5
Figura 3: Métodos de estimativa de custos (Adaptado de Niazi 2006)	6
Figura 4: a) Torneamento: 1 – rotação da peça, 2 – avanço da ferramenta, 3 – penetração; b) Fresagem	9
Figura 5: Fresagem com fresa a) avanço por dente de uma fresa, b) largura de corte com uma fresa	10
Figura 6: Fatores que influenciam o custo total de um produto	14
Figura 7: Folha de orçamento proposta	23
Figura 8: Representação das peças a maquinar: (a) peça P1 (b) peça P2	25
Figura 9: Geometrias base e respectivas entidades das peças a maquinar	26
Figura 10: Variáveis para calcular o volume removido de material	31
Figura 11: Tempo de maquinagem utilizando CNC. Esquerda P1 e direita P2	38
Figura 12: Tempo de maquinagem por peça de P1 e P2 com variação do tamanho de lote	39
Figura 13: Peso dos diferentes tempos de fabrico da peça P1 a)1 unidade de produção, b)30 unidades de produção, c)300 unidades de produção. Tn-Tempo improdutivo, To-Tempo de operação, Tlt-Tempo de carregamento/descarregamento da peça, Ttf-Tempo de troca de ferramenta, Ts-Tempo de <i>set-up</i>	40
Figura 14: Peso dos diferentes tempos de fabrico da peça P2 para a)1 unidade de produção, b)30 unidades de produção, c)300 unidades de produção. Tn-Tempo improdutivo, To-Tempo de operação, Tlt-Tempo de carregamento/descarregamento da peça, Ttf-Tempo de troca de ferramenta, Ts-Tempo de <i>set-up</i>	41
Figura 15: Custo de maquinagem por peça de P1 e P2 com variação do tamanho de lote	43
Figura 16: Peso dos diferentes custos de fabrico da peça para P1 a)1 unidade de produção, b)30 unidades de produção, c)300 unidades de produção. C1-Custo de remoção de material, C2-Custo da ferramenta, C3-Custo de máquina parada, Cma-Custo do material	44
Figura 17: Peso dos diferentes custos de fabrico da peça P2 a)1 unidade de produção, b)30 unidades de produção, c)300 unidades de produção. C1-Custo de remoção de material, C2-Custo da ferramenta, C3-Custo de máquina parada, Cma-Custo do material	44
Figura 18: Orçamento proposto pelas empresas e o obtido teoricamente para a peça P1	46
Figura 19: Orçamento proposto pelas empresas e o obtido teoricamente para a peça P2	46

Lista de Tabelas

Tabela 1: Recursos específicos associados aos diferentes custos (Adaptado de Rajkumar 2011).	4
Tabela 2: Dados necessários para se realizar um orçamento preciso (Adaptado Rajkumar, <i>et al</i> 2011)	7
Tabela 3: Melhorias em relação a métodos convencionais (Davim e Correia 2006)	13
Tabela 4: Inputs do sistema de estimativa (Jung 2002)	18
Tabela 5: Tempos de set-up para algumas máquinas-ferramentas (Adaptado de Singal 2008)	20
Tabela 6: Tempo em segundos de carregamento/descarregamento de diferentes pesos de peças de trabalho (Adaptado de Singal 2008)	20
Tabela 7: Descrição de semi-produtos utilizados (AÇOS RAMADA 2013)	25
Tabela 8: Associação das geometrias bases encontradas à operação, ferramenta e máquina	27
Tabela 9: Proposta de sequência de maquinagem para a peça P1	28
Tabela 10: Volume a remover face à entidade em questão de P1	29
Tabela 11: Ficha de Fase proposta para P1 (SANDVIK 2015a)	29
Tabela 12: Sequência de maquinagem proposta para a peça P2	30
Tabela 13: Volume a remover face à entidade em questão de P2	32
Tabela 14: Ficha de Fase proposta para P2 (SANDVIK 2015b)	32
Tabela 15: Ferramentas utilizadas do catálogo da Sandvik	33
Tabela 16: Operações para a peça P1	34
Tabela 17: Operações para a peça P2	35
Tabela 18: Tempos de operação de P1 e P2	37
Tabela 19: Tempos de maquinagem para P1 e P2	37
Tabela 20: Tempos de corte por operação obtidos para ambas as peças, pelo <i>Autodesk Fusion 360</i>	38
Tabela 21: Comparação dos valores do software com os calculados teoricamente	39
Tabela 22: Custo de operação para as peças P1 e P2	42
Tabela 23: Custos de maquinagem para P1 e P2	42
Tabela 24: Preço em € + IVA por unidade da empresa A	45
Tabela 25: Preço em € + IVA por unidade da empresa B	45
Tabela 26: Preço em € + IVA por unidade da empresa C	45

Simbologia

f	Avanço
v_r	Avanço Rápido
C_L	Custo de mão-de-obra
C_m	Custo da máquina
CM_a	Custo por peso de material
DG_f	Custo das despesas administrativas
CM	Custo de maquinagem
CM_p	Custo de maquinagem por peça
C_F	Custo com a ferramenta
L_r	Distância percorrida em avanço rápido
D_1	Diâmetro inicial da peça
D_2	Diâmetro final da peça
Df	Diâmetro da ferramenta
a_e	Largura fresada
ρ	Massa volúmica
z_n	Número de dentes da ferramenta
N_f	Número de ferramentas usadas
nt	Número de arestas de corte por pastilha
na	Número de afiações por ferramenta
N_d	Número de dentes da ferramenta
C_{ma}	Preço do material
a_p	Profundidade de corte
C_f	Preço de compra da ferramenta
T	Tempo de vida da ferramenta
t_r	Tempo de reposicionamento da peça
t_i	Tempo de controlo dimensional
T_n	Tempo improdutivo
T_o	Tempo de cada operação
t_l	Tempo de substituição da ferramenta
t_{lt}	Tempo de carregamento/descarregamento da peça
t_{et}	Tempo de aproximação da ferramenta à peça
t_{tf}	Tempo de troca de ferramenta na torreta
t_c	Tempo de corte
t_v	Tempo em vazio
t_{sm}	Tempo de <i>set-up</i> da máquina
t_{st}	Tempo de <i>set-up</i> das ferramentas
N	Tamanho de lote
Q	Taxa de remoção
v_f	Velocidade de avanço
n	Velocidade da árvore
v_c	Velocidade de corte
V	Volume a remover
Vp	Volume de perfil do material

Lista de Abreviaturas

CNC	Controlo numérico por computador
CAD	Desenho assistido por computador
CAM	Fabrico assistido por computador
CPU	Unidade central de processamento

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A indústria encontra-se em desenvolvimento, e isso potencia as empresas a manterem-se competitivas, por essa razão, existe uma preocupação em garantir a qualidade dos produtos a baixos preços (Shehab e Abdalla 2001). Um dos processos que permite isso é a maquinagem, amplamente utilizado na indústria de produção de peças, uma vez que permite o fabrico de peças com qualidade, nomeadamente ao nível de precisão e ausência de defeitos, com alguma complexidade num curto espaço de tempo (Winston e Knight 2006).

Atualmente, a maquinagem encontra-se altamente automatizada. Máquinas de controlo numérico por computador, CNC, são usadas e existe uma necessidade económica para as rentabilizar ao máximo. Apesar do seu investimento ser elevado a utilização desta tecnologia aumenta o volume de produção, assim como o seu controlo. A implantação de *softwares* industriais como o CAD (*Computer Aided Design*) e o CAM (*Computer Aided Manufacturing*) aumentam a eficiência dos sistemas CNC, porque permitem otimizar o *design* das peças que se pretendem fabricar, ao nível da sequência das operações, tempos de corte, etc (Rao 2011 ,Elanchezhian 2005, Lihui Wang *et al.* 2004).

Vários fatores afetam a produção de uma determinada peça. A previsão destes, numa fase inicial de planeamento, permite detetar erros que possam surgir no futuro, evitando assim paragens posteriores e consequentemente, aumentando a eficiência do processo (Niazi e Dai 2006 ,Yildiz 2013,Lihui Wang *et al.* 2004). No entanto, para maquinar uma peça, existem várias abordagens possíveis, porque cada uma delas tem custos e níveis de qualidade associados. Geralmente, numa fase inicial, a informação tecnológica para o processo não é detalhada. A máquina-ferramenta, o material, geometria das ferramentas de corte, velocidades, avanços e refrigerantes, são geralmente selecionados pela experiência passada com peças de geometria semelhante, recomendações de *handbooks* ou dados de catálogos. Mesmo tendo acesso a estas informações, as decisões para orçamentar os custos de produção são complexas, especialmente, quando se lida com fornecedores (Roy 2014, Jung 2002, Shehab e Abdalla 2001).

1.2. Objetivos

O objetivo principal, é criar uma ferramenta capaz de realizar um orçamento de peças maquinadas, que permita numa fase inicial de conceção de produto avaliar os custos de produção de forma a tornar a empresa competitiva face ao mercado onde se encontra. Nesse domínio, dever-se-á criar uma metodologia que permita a análise dos custos do processo de maquinagem para peças cilíndricas e prismáticas. Assim sendo, é necessário estudar o custo do tempo de fabrico das seguintes operações: fresagem, torneamento e furação. Além disso, pretende-se também avaliar a variação do custo em

função do número de peças a fabricar de um lote. Será, portanto, preciso estudar os diferentes fatores que representam os custos na produção de um produto e analisar os métodos já desenvolvidos por outros investigadores na mesma área de foco.

Com vista a comparar o método realizado, recorreu-se a alguns orçamentos provenientes de empresas da área da metalomecânica, para os mesmos casos de estudo.

1.3. Estrutura do trabalho

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, correspondendo o primeiro a uma introdução geral do problema, na qual se apresentam os objetivos da tese. No capítulo 2, é feita uma investigação sobre os custos de fabrico de uma peça, focando apenas as operações de fresagem, torneamento e furação. O capítulo seguinte, compreende os objetivos da investigação e a metodologia adotada para calcular tempo e custo de maquinagem. No quarto capítulo, são aplicados dois casos de estudo para testar a metodologia desenvolvida anteriormente. No capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos em ambos os casos. Por fim, o último capítulo compreende as conclusões gerais da dissertação e aborda as perspetivas de trabalho futuro.

2. Cálculo de custos de maquinagem

Neste capítulo será feita uma definição dos vocábulos custos e recursos. Referir-se-ão os métodos utilizados para estimar custos, tendo em conta a sua aplicação ao processo de fabrico, nomeadamente à maquinagem. Referir-se-á ainda a influência do processo de maquinagem no orçamento final, em particular na utilização dos sistemas CNC.

2.1. Custos e Recursos

Um custo é, resumidamente, a quantidade de dinheiro que se investe em recursos necessários para produzir um produto (Souchoroukov 2004).

Recursos são, por sua vez, bens físicos que permitem a realização de uma determinada operação, por exemplo: máquinas, ferramentas, operadores, materiais, etc. (Jung 2002, Rajkuman 2011). Como se depreende, custos e recursos vivem numa relação de dependência (não se pode conceber uns sem os outros).

Geralmente, numa empresa, o produto passa pelos setores presentes na figura 1:

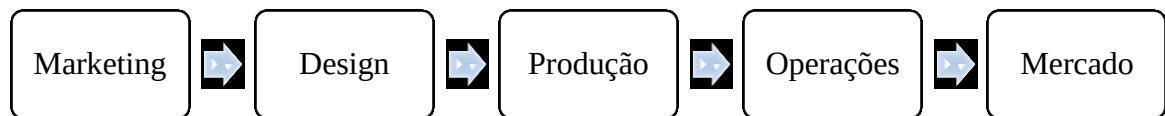


Figura 1: Setores de uma empresa (Adaptado de Rajkumar 2011)

Embora cada setor apresente recursos específicos, os quais, no final, irão ditar o custo do produto, note-se que os mesmos [recursos] funcionam de modo interligado, sendo, por isso, dependentes (Asiedu e Gu 2010). Assim sendo, não os podemos conceber isoladamente, pelo que não devemos entendê-los como compartimentos estanques. Porém, para facilitar tarefas, podemos atribuir mais responsabilidades aos sectores do *design*, compras e planeamento pelos custos de desenvolvimento. O setor de produção é, geralmente, responsável pelos custos de fabrico e o setor das vendas é responsável pelas operações de vendas. A soma do custo dos recursos despendidos em cada um dos setores indicará o custo total do produto (ver Tabela 1).

Tabela 1: Recursos específicos associados aos diferentes custos (Adaptado de Rajkumar 2011).

Custos de desenvolvimento	Custos de fabrico	Custos de manutenção	Custos externos
Planeamento	Máquinas	Limpeza	Impostos
Investigação	Ferramentas	Manutenção	Reciclagem
<i>Design</i>	Mão de obra		
<i>Software</i>	Operações		
Teste e avaliação	Controlo de qualidade		
Marketing	Logística		
	Material		

2.1.1. Custos diretos e indiretos

Dentro dos vários setores e dos diferentes recursos que cada um tem à sua disposição, há custos que se podem classificar em diretos e indiretos (Souchoroukov 2004). Todos eles interferem na realização do orçamento.

Custos diretos são aqueles que são facilmente identificados e objetivamente mensuráveis (Fehmi e Martin 2006). É o que ocorre quando se consegue saber à partida a quantidade de recursos necessários. O conhecimento, *a priori*, destes pré-requisitos, permite associar um preço tabelado a cada recurso. Neste domínio, pode-se referir a título de exemplo o ordenado base dos operários dos vários sectores, porque este se encontra tabelado. Pode-se saber também o preço de determinado volume de material, visto que ele está representado por uma massa que tem um determinado custo por kg.

Custos indiretos não são facilmente identificados, nem mensurados de forma objetiva (Fehmi and Martin 2006). Por exemplo, o valor que se paga pela experiência profissional dos operários, a mão-de-obra representada pelo trabalho dos departamentos auxiliares: supervisores, controladores de qualidade, etc, (Jung 2002).

Os custos diretos e indiretos podem ser fixos e variáveis. Os custos fixos não variam com a taxa de produção (Jung 2002). Ex: o ordenado de um operário, alugueis de equipamentos e instalações.

Os custos variáveis dependem da taxa de produção. Ex: quantidade de material e ferramentas consumidas.

2.1.2. Importância da estimativa de custos na fase inicial

Durante a fase de *design*, as decisões tomadas relativamente às características do produto podem influenciar significativamente os custos do projeto numa fase mais avançada (Fehmi e Martin, 2006). Há estudos que mostram que o *design* representa um custo de 10% no preço final do produto, mas as decisões tomadas pelos profissionais responsáveis (geometria a obter, sequência de maquinagem, etc..) nesta fase, afetarão 70% dos custos futuros da produção do produto (Figura 2), (Shehab e Abdalla 2001). Por este motivo, a estimativa dos custos nesta fase deve ser o mais precisa possível visto que ainda se trata de uma fase bastante prematura do projeto. A maior dificuldade é encontrar informação tecnológica detalhada sobre o item a fabricar (Locascio 2000).

É de referir também que uma alteração no projeto quando este já se encontra definido e planeado, implica, na maior parte dos casos, uma solução dispendiosa (Roy, Souchoroukov e Griggs 2008).

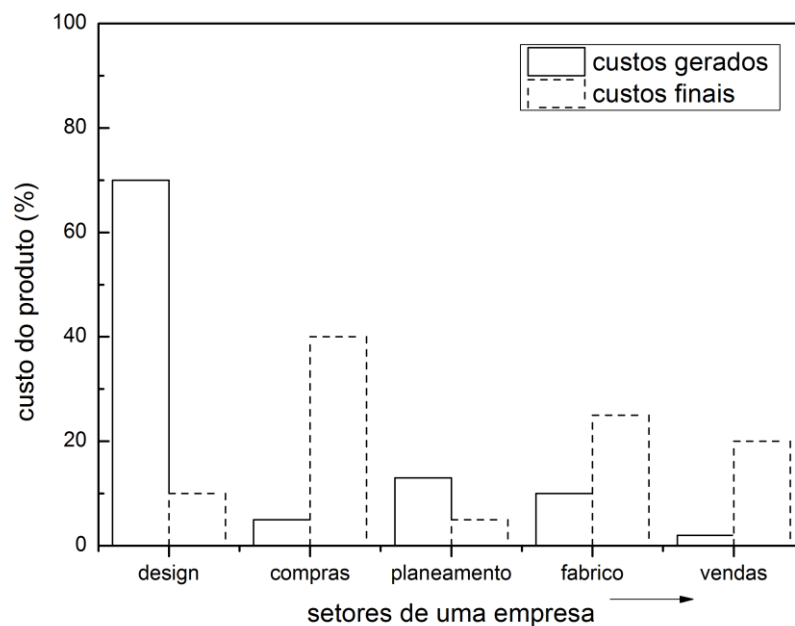


Figura 2: Influencia dos diferentes departamentos de uma empresa nos custos futuros de um produto (Adaptado de Souchoroukov, 2004)

2.2. Métodos de Estimativa

O orçamento é a capacidade de estimar e prever o custo dos recursos e das atividades necessárias para a produção de um produto (Ou-Yang e Lin 1997). Um orçamento pode utilizar um método que melhor lhe convenha, ou pode mesmo utilizar mais que um método (Duverlie e Castelain 1999).

Investigadores como Saptiora, Kiswanto e Soemardi 2014 e Shehab e Abdalla 2001, identificam vários métodos para estimar os custos de uma produção e classificaram-nos em métodos qualitativos e quantitativos (Figura 3).

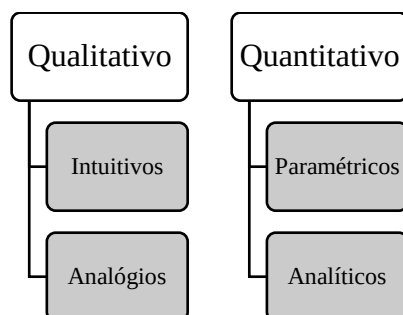


Figura 3: Métodos de estimativa de custos (Adaptado de Niazi 2006)

Método intuitivo para estimar custos

O método intuitivo é baseado em técnicas que usam a experiência pessoal, ex: os anos de trabalho dos profissionais, são um fator facilitador da intuição. É nesse domínio que é estimado o custo para peças e conjuntos. A informação pode ser guardada em bases de dados, ou como um conjunto de regras base a seguir (Niazi 2006, Saptiora, *et al.* 2014).

Método analógico para estimar custos

Este método utiliza como critério a semelhança do produto que se vai fazer com outros já fabricados. Através de bases de dados com o histórico do produto semelhante já fabricado, é criado o método de estimativa de custo para o novo produto (Tandon e Kishawy 2002, Niazi 2006, Dwi *et al.* 2014).

Método paramétrico para estimar custos

Métodos paramétricos usam relações matemáticas para expressar o custo. Para tal, é criada uma função que integra diversas variáveis, responsáveis por alterar o custo de um determinado produto. Exemplos destas variáveis são o tempo de maquinagem, o número de ferramentas utilizadas e o tempo de preparação da máquina. Esta metodologia é utilizada quando essas variáveis são facilmente identificado (Qian e Ben-Arieh 2008).

Método analítico para estimar custos

Este método requer que se decomponha o produto em unidades elementares, operações e atividades que representem os diferentes recursos consumidos durante a produção, e expressem o custo como a soma de todos esses elementos (Aderoba 1997).

2.3. Dados necessários para realizar um orçamento

Como foi visto na secção 2.1.2, a estimativa de custos desempenha um papel importante no ciclo de desenvolvimento do produto. Depois de uma solicitação para um orçamento, os responsáveis por esta tarefa juntam a informação necessária, para dar início a esta fase (Shehab e Abdalla 2001).

Estimativas precisas permitem analisar a margem de lucro possível a obter, avaliar o nível de competitividade face a outras empresas e simplificar o investimento na aquisição de uma ferramenta, por exemplo (Rajkumar 2011, Souchoroukov 2004). Para que a estimativa seja precisa, é necessário: identificar o material, o processo de fabrico, a máquina, a mão de obra e a ferramenta de corte.

Tabela 2: Dados necessários para se realizar um orçamento preciso (Adaptado Rajkumar, *et al.* 2011)

Material	O material pode ser identificado pelas especificações técnicas do produto, desenhos, lista de materiais ou modelos físicos. Se estes documentos não estiverem disponíveis, os estimadores utilizam o seu próprio julgamento. O fabrico de componentes gera desperdício, sucata, que tem de ser tida em consideração por aumentar o custo total do material.
Processo de fabrico	É importante que o responsável tenha conhecimento do ponto de vista técnico sobre o produto, visto que vários processos de fabrico podem ser utilizados. Para seleccionar o processo de fabrico, é preciso considerar dois aspetos. Um é o tipo de material que se vai trabalhar; outro é o volume da produção. É de toda a conveniência que se adquira informação sobre o processo mais utilizado na indústria para fabricar um produto semelhante ao que se deseja. A identificação do processo de fabrico normalmente está relacionada com a seleção da máquina para o trabalho.
Máquina	A seleção da máquina é, sobretudo, baseada nas suas características técnicas e é feita através do entendimento dos custos associados, como energia elétrica, água e ar comprimido, juros e depreciação do investimento do capital da máquina. De facto, estes custos são, em princípio, atribuídos à máquina, porque constituem fatores que possibilitam a sustentabilidade da produção. Ocasionalmente, é necessário efetuar manutenção, reparação e, com mais frequência, limpeza. Estas tarefas agravam os custos de máquina, e devem ser tidos em conta na estimativa.

Mão de Obra	A mão de obra é dividida em direta e indireta. A direta considera dois aspetos: o nível salarial do trabalhador e o tempo da operação. A indireta considera trabalhadores que não acrescentam valor ao produto, mas que assistem de alguma forma (supervisionar, vendas e limpeza), acrescentando valor à produção. A margem salarial de um trabalhador varia com o tipo de indústria, e também pela comparação que é feita entre as empresas que trabalham na mesma área. Este fator é incluído na estimativa de custos.
Ferramenta	Uma ferramenta, normalmente, é utilizada para fabricar várias peças. Portanto, quando se estima os custos das ferramentas, é importante saber aproximadamente quantas peças podem ser produzidas com uma só ferramenta, para que se estime quantas são necessárias adquirir, para fabricar o lote desejado.

Neste estudo, o processo a utilizar é a maquinagem e, como tal, é necessário possuir alguns conhecimentos teóricos sobre as operações que se vão estudar, de forma a ser possível interpretar a maquinagem do ponto de vista económico.

2.3.1. Teoria de maquinagem

Toda a peça mecânica evolui de um estado inicial, correspondente ao semi-produto ou esboço (peça em esboço), até à peça final acabada (Completo, *et al.* 2009). O valor acrescentado ao produto é representado pelo conjunto de operações de maquinagem, entre o estado inicial e final. Ao conjunto de documentos onde são definidas, de maneira cronológica e global, as diferentes fases de transformação da peça por maquinagem, designa-se por sequência de maquinagem (uma fase de transformação representa um conjunto de operações a efetuar, num mesmo posto de trabalho, num mesmo posicionamento e fixação da peça), (Stephenson e Agapiou 2016).

As operações de maquinagem tomam designações diferentes, dependendo da máquina-ferramenta, ferramentas de corte utilizadas e dos movimentos gerados. Para gerar uma superfície por maquinagem, são necessários, no mínimo, dois movimentos simples: o movimento de corte e o movimento de avanço (Completo, *et al.* 2009). O movimento de corte, dependendo do processo utilizado (figura 2.4), poderá ser um movimento de rotação da ferramenta (fresagem e furação) ou da peça (torneamento). O movimento de avanço corresponde à mudança de posição da peça relativamente à ferramenta, durante a criação da superfície de corte. Considera-se também o movimento de penetração, aquele que corresponde à espessura da camada de material a remover durante a operação de corte (Singal 2008). Este movimento é de translação, e tem a direção perpendicular às direções de avanço (Completo, *et al.* 2009).

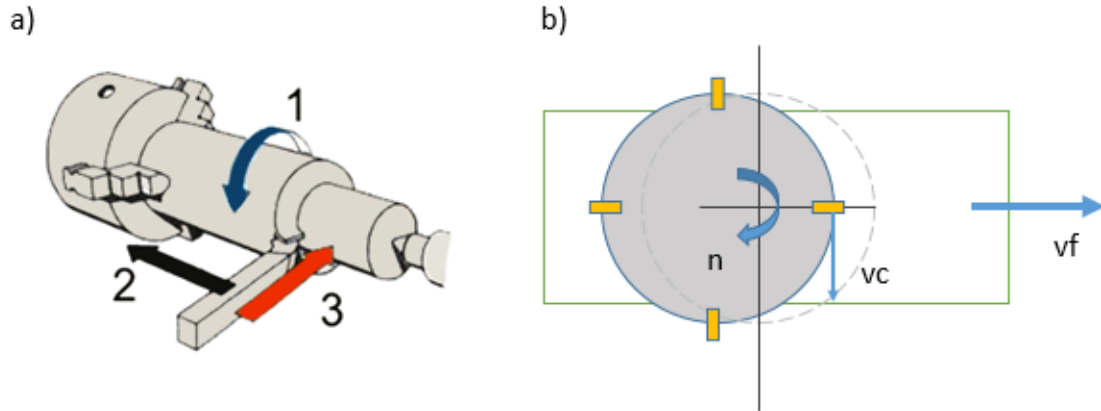


Figura 4: a) Torneamento: 1 – rotação da peça, 2 – avanço da ferramenta, 3 – penetração; b) Fresagem (Adaptado de SANDVIK Coromant)

O torneamento depende dos seguintes parâmetros: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte (figura 5b). A velocidade de corte (m/min) é obtida pela expressão (2.1).

$$v_c = \frac{n \times (D_1 + D_2) \times \pi}{1000 \times 2}, \quad (2.1)$$

em que n (rpm) é a velocidade do fuso, D_1 e D_2 (mm) é o diâmetro inicial e final da peça e v_c (m/min) é a velocidade de corte (Stephenson e Agapiou 2016).

A taxa de remoção do metal no torneamento Q (cm³/min) é obtida por:

$$Q = f \times v_c \times a_p, \quad (2.2)$$

em que f (mm/rot) é o avanço por rotação, v_c (m/min) a velocidade de corte, a_p (mm) é a profundidade de corte. No torneamento, o volume de material a remover numa determinada operação é determinado pela diferença entre o volume inicial e o volume final desejado (Winston e Knight 2006).

A operação de fresagem depende dos seguintes parâmetros: velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte e o número de dentes da fresa. Na fresagem, a velocidade de corte é obtida pela equação (2.3).

$$v_c = \frac{n \times Df \times \pi}{1000}, \quad (2.3)$$

em que Df (mm) é o diâmetro da ferramenta. O avanço por dente f_z (mm/dente) é dado por:

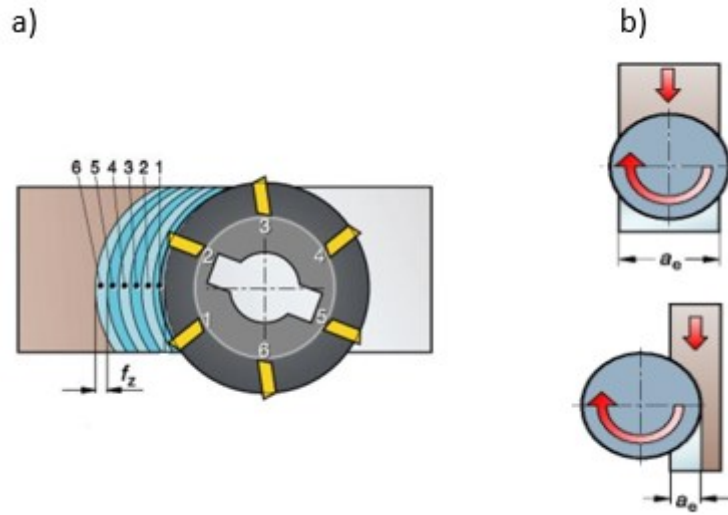


Figura 5: Fresagem com fresa a) avanço por dente de uma fresa, b) largura de corte com uma fresa (Adaptado de SANDVIK Coromant)

$$f_z = \frac{v_f}{n \times z_c}, \quad (2.4)$$

em que v_f (mm/min) é a velocidade de avanço e z_c é o número de dentes (figura 2.5a).

A taxa de remoção do metal na fresagem Q , é dada pela equação (2.5).

$$Q = \frac{a_e \times v_f \times a_p}{1000}, \quad (2.5)$$

em que a_e (mm) é a largura da fresada (figura 2.5b).

O desempenho da furação depende do material envolvido, da geometria da broca, da velocidade da árvore, e do avanço (Juneja 2003). O avanço por rotação f , é dado pela equação 2.6.

$$f = \frac{v_f}{n} \quad (2.6)$$

A taxa de remoção do metal na furação, Q , é obtida pela equação (2.7).

$$Q = \frac{D_f \times v_c \times f}{4} \quad (2.7)$$

Por fim, o tempo de corte t_c (min) para as operações anteriores é obtido por:

$$t_c = \frac{V}{Q}, \quad (2.8)$$

em que V (cm^3), é o volume a remover. O tempo de corte corresponde à situação em que a ferramenta entra em contacto com o material a remover.

2.3.2. Economia de maquinagem

Quando o processo de fabrico utilizado é a maquinagem, o custo depende sobretudo do tempo de corte das operações (Singal 2008). A taxa de velocidade desempenha um papel importante na determinação do tempo de corte. Se o material for removido a baixa velocidade, o tempo para completar a operação aumenta. Consequentemente, o custo de mão-de-obra, de máquina e despesas gerais de fábrica crescem, aumentando assim o custo final de fabrico (Stephenson e Agapiou 2016). Se, na mesma situação, a velocidade aplicada for alta, o desgaste das ferramentas é maior causando mais paragens da máquina, obrigando à sua substituição. Como resultado o custo de ferramenta e o tempo improdutivo aumentam (Stephenson e Agapiou 2016). A sequência de maquinagem é importante, porque se trata de uma das etapas essenciais para reduzir ao máximo os custos de produção, garantindo a qualidade do produto final (Completo, *et al.* 2009). Posto isto, é importante considerar alguns aspetos, nomeadamente, a redução do tempo de transporte entre fases e reduzir ao máximo os tempos de montagem e desmontagem da peça entre fases (tempos improdutivos). Quando se fala em médias e grandes séries, o sistema de apoio e aperto deve ser desenvolvido especificamente, de forma a reduzir os tempos de posicionamento e de aperto da peça na máquina (Completo, *et al.* 2009).

Os tempos improdutivos, são gerados pelo tempo em que a ferramenta de corte não se encontra a remover material, ou quando a máquina está parada (Juneja 2003). Alguns dos fatores mais relevantes, são o carregamento e descarregamento da peça a maquinar, o *setup* da máquina e das ferramentas, o tempo de troca de ferramenta e o tempo em vazio (Dewhurst e Boothroyd 1988, Singal 2008 Completo, *et al.* 2009).

- Montagem e desmontagem da peça: Estes tempos são função do peso e volume do material a maquinar, do tipo de máquina ferramenta e do aparelho de fixação.
- *Setup* da máquina: O *setup* de uma máquina está relacionado com o tempo despendido para o planeamento das operações de maquinagem. Nesta fase, é definido o percurso da ferramenta por operação, assim como o avanço, a velocidade de corte, a profundidade de corte, etc. No caso da utilização de CNC, adiciona-se o custo da programação.
- *Setup* da ferramenta: Está relacionado com o tempo que leva a fixar as ferramentas na máquina-ferramenta, que gera custos improdutivos.
- Troca de ferramenta: Sempre que uma ferramenta se desgasta, necessita de substituição, ou seja, a introdução de uma nova ferramenta ou de uma nova aresta de corte. Consequentemente, cria-se um intervalo de tempo em que a máquina não se encontra em trabalho. Isto agrava os custos não

produtivos. Se diferentes ferramentas são utilizadas, existem custos adicionais de aproximação e de indexação causados pela nova ferramenta.

- Tempo em vazio: Os custos de fabrico são agravados, devido ao tempo perdido com a aproximação e afastamento da ferramenta numa nova operação.

As frequentes alterações nos produtos, com o objetivo, de baixar os seus custos de produção conduzem à elevada competitividade do mercado (Ben-ariéh, *et al.* 2002). Isto impõe uma redução do tempo de conceção logo, do tempo de estudo das sequências de maquinagem. Por conseguinte, a engenharia de processo ou métodos, apoia-se no eficaz conhecimento dos processos tecnológicos de produção instalados na empresa. Tal como foi referido no método analógico, no desenvolvimento de uma nova peça é preciso encontrar similitudes com aquelas em que já se controla na perfeição o seu processo de fabrico. Quanto maiores as similitudes, maior será a capacidade de previsão e rapidez na colocação da série a fabricar em produção. Os documentos do processo de industrialização existentes na empresa (sequência de maquinagem, fichas de fase, cartas de controlo, etc.), constituem um banco de dados consultável pelos engenheiros e técnicos que trabalham nas fases de preparação de trabalho dos novos produtos. Quando não existem similitudes com outras peças, torna-se fundamental a criação de novos documentos, com os parâmetros tecnológicos da sequência de maquinagem do novo produto, constituindo assim uma nova memória da empresa acessível aos diferentes intervenientes no processo produtivo (Completo, Festas e Davim 2009). A partir de uma geometria de base da peça, é possível associar um conjunto composto de máquina-ferramenta, de ferramenta e de operação, para efetuar a maquinagem. A isto denomina-se entidade. A entidade representa um conjunto de dados tecnológicos que consiste num conjunto de soluções possíveis de maquinagem. Esta, vai permitir procurar a adequação entre a forma geométrica a gerar e a ferramenta a utilizar para a máquina prevista. (Liu *et al.* 2013, Jung 2002)).

As máquinas de controlo numérico computadorizado (CNC) de alta velocidade são uma solução para reduzir os tempos improdutivos do fabrico, assim como outros aspetos expostos mais à frente (Ruffo, *et al.* 2006). Sem necessidade de presença do operador, diferem das máquinas convencionais, pelos seus movimentos totalmente independentes do operador. CNC é uma técnica que consiste em dirigir o funcionamento de uma máquina a partir de um programa, sem intervenção direta do operador durante a sua execução (Davim e Correia 2006).

2.3.3. Controlo numérico por computador

Atualmente, apesar do elevado investimento em sistemas de controlo numérico, este pode ser utilizado de maneira económica para pequenas séries, ou mesmo para peças unitárias, em particular se as mesmas não implicam formas complexas (Davim e Correia 2006). Isto é possível devido ao avanço da microeletrónica e da informática industrial, que permitem grandes capacidade de cálculo de CPU do controlador. O ganho no tempo de execução, traduz-se em prazos de realização mais

curtos e numa maior disponibilidade do equipamento para a conceção de novas séries. Estes ganhos resultam de diferentes fatores (Tabela 3), (Completo, *et al.* 2009).

Tabela 3: Melhorias em relação a métodos convencionais (Davim e Correia 2006)

Redução dos tempos improdutivos	Colocação em posição das ferramentas à velocidade de avanço rápido, possibilidade de proceder a trocas automáticas da ferramenta; pela possibilidade de troca de mesa de trabalho e pela aplicação da variação contínua das velocidades;
Supressão de operações	Que seriam necessárias para efetuar um trabalho preciso, traçagem e utilização de operações de ponteamento;
Realização de superfícies complexas	Gerando movimentos em simultâneo nos diferentes eixos;
Definição de condições operatórias ideais	Possibilidade de variar em contínuo a velocidade de corte e, assim, aumentar a vida da ferramenta;
Atenuação do fator humano	Garantindo repetitividade e grande precisão de execução, o que diminui as tarefas de controlo;
Permissão de flexibilidade	Facilidade oferecida em técnicas de modos de carregamentos dos programas e de armazenamento de dados;
Integração de equipamentos periféricos	Banco de medida de ferramentas, manipuladores, eixos rotativos automáticos, sistemas de aperto-peça automáticos e medição integrada.

Para além das melhorias relativamente às máquinas convencionais, os sistemas CAD/CAM são responsáveis por garantir o máximo de eficiência da produção, servindo como auxílio para que máquinas e trabalhadores optem pelas melhores soluções, tanto a nível de sequência, como ferramenta a utilizar. Os sistemas CAD fornecem uma série de ferramentas para a construção de entidades geométricas planas (linhas, curvas e polígonos) e tridimensionais (cubos, esferas, etc.). Existem modelos CAD específicos que simulam as condições de fabrico, ou seja, utilizam as mesmas ferramentas utilizadas no chão de fábrica (estes geralmente designados por CAM). O CAM trabalha com base nos modelos matemáticos provenientes do sistema CAD. Através desses modelos, os sistemas geram um arquivo com o caminho da ferramenta através de um pós-processador (*software* que gera o programa de comando específico da máquina). Devido a isto, os sistemas CAM permitem

transferir todas as coordenadas para as máquinas CNC efetuarem a maquinagem da peça (Álvares, *et al.* 2008).

Entende-se, então, que o custo de fabrico por maquinagem de uma peça é efetuado pela soma do custo do material, da mão-de-obra, máquina e custo das ferramentas de corte (Ferraresi 1969). Para que a estimativa seja o mais fiável possível, é importante adicionar ao custo de fabrico os custos que não são tão facilmente identificados, como as despesas gerais de fábrica e logística, ou seja, custos indiretos (custos de renda de edifício, equipamentos de escritório e salários de supervisores e gestores). Como o cálculo destes custos é uma tarefa que ocupa muito tempo, normalmente é utilizado uma margem percentual. Estas margens são agrupadas, porque o orçamento é efetuado numa fase inicial e, nessa fase, ainda não se possui informação detalhada sobre esses custos. Por exemplo, os custos de vendas e administração geral, que cobrem as atividade administrativas e outras, são agrupados numa margem percentual (Shehab e Abdalla 2001).

Os custos logísticos são todos aqueles que estão associados ao transporte do produto, desde o armazém do fornecedor até ao armazém do cliente. O responsável por avaliar os custos logísticos deve compreender os requisitos de entrega, como por exemplo o tipo de embalagem que se usa para proteger as peças. A localização do fornecedor e o tipo de produto são fatores a ter em conta, e são dados necessários para seleccionar o meio de transporte (Rajkumar, *et al.* 2011).

O custo total da peça é então a soma de todos os custos analisados anteriormente, para além dos custos de não qualidade e inventário (figura 6). A estes é adicionado a taxa de lucro. Este total é o preço estimado que o cliente deve pagar. No entanto, como a estimativa de custos é apenas uma tentativa de aproximação à realidade, o fornecedor pode eventualmente apresentar um orçamento com maior ou menor taxa de lucro (Rajkumar, *et al.* 2011).

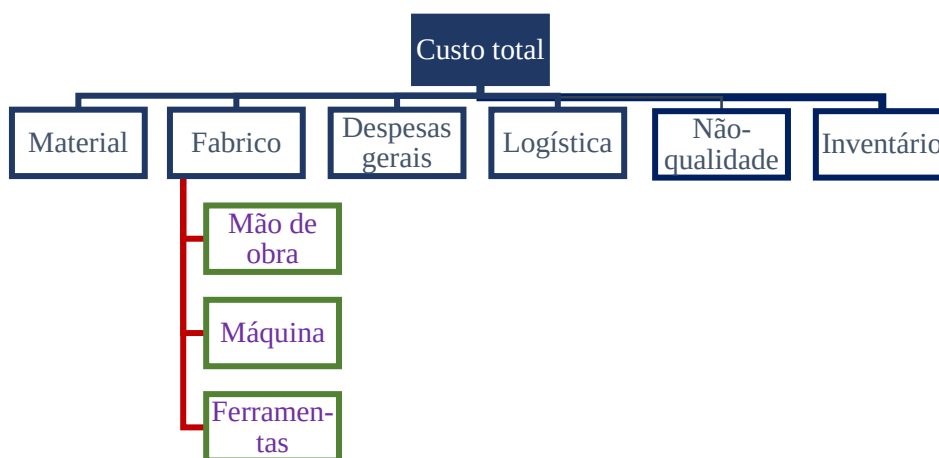


Figura 6: Fatores que influenciam o custo total de um produto

Síntese:

Neste capítulo, retira-se que os recursos necessários para produzir um produto, representam um custo. Por sua vez, o produto atravessa diversos setores dentro de uma empresa até estar concluído (*design*, compras, planeamento, produção e vendas). Esses custos, podem ser facilmente identificados (diretos) ou não (indiretos). Com o número de peças a produzir, os custos, aumentam, diminuem (variáveis), ou, permanecem constantes (fixos).

De forma a prever os custos de um produto numa fase inicial, recorre-se a métodos qualitativos, ou quantitativos. Dentro dos qualitativos, utiliza-se como critério a experiência de um profissional da área (intuitivo), ou a semelhança do novo produto com outros produtos já produzidos pela empresa (análogo). No caso dos métodos quantitativos, recorre-se a relações matemáticas (paramétrico), ou na decomposição do componente em unidade elementares (analítico). Em muitos casos, conjugam-se vários critérios.

Para a estimativa ser precisa, é necessário obter-se dados relativos ao material, processo, máquina, mão de obra e ferramentas a utilizar. Quando se utiliza a maquinagem como processo, o tempo de operação é responsável por variar o custo de fabrico. Como tal, a redução dos tempos improdutivos, torna-se importante, no sentido de aumentar a eficiência do processo. A utilização de sistemas de controlo numérico CNC, reduz os tempos improdutivos, confere qualidade aos componentes maquinados, entre outras melhorias.

Em suma, com este capítulo entende-se que os custos de um produto, são compostos pelos custos de material, fabrico, despesas gerais e logísticos.

3. Metodologia

Dando seguimento ao referido no capítulo 2, pretende-se neste capítulo desenvolver o método, para estimar os custos de maquinagem. Neste sentido, serão desenvolvidos um conjunto de fórmulas e associações capazes de efetuar um orçamento.

3.1. Formulação do problema

O maior problema em desenvolver um ambiente integrado para a realização de um orçamento, é identificar e relacionar os fatores que permitem, numa fase inicial (planeamento), realizar uma estimativa dos custos futuros. Com esta previsão, é possível realizar alterações a nível do projeto, de forma a diminuir os custos (já referido no capítulo 2, secção 2.1.2). Com base neste problema, são levantadas duas questões.

- Quais os fatores que afetam o custo de produção? Qual a informação necessária para um sistema que avalia os custos?

Como foi referido no capítulo 2, existem em todas as fases do ciclo de desenvolvimento de um produto, recursos que contribuem para o seu custo final. Na maquinagem, o tempo de operação é determinante na variação do custo de uma peça (referido no capítulo 2 secção 2.3.2). Isto porque, é o tempo que faz variar os custos que se conseguem prever na fase inicial (custos estes diretos, como o custo da mão de obra, da máquina e da ferramenta de corte). Assim sendo, é necessário relacionar o tempo de maquinagem com o fator económico dos recursos utilizados na produção.

Além do fator tempo, é necessário compreender que numa fase inicial de desenvolvimento do produto, não se possui um conhecimento detalhado sobre os parâmetros a utilizar no processo (Ficko *et al.* 2005). Há, no entanto, ainda, dois fatores decisivos nesta fase que convém não esquecer, porque estes influenciam bastante o custo de produção de uma peça. Estes são, a complexidade das formas geométricas que constituem a peça a fabricar (também referido no capítulo 2 secção 2.3.2) e a sua rugosidade superficial (Ou-Yang e Lin 1997). No geral, estes três fatores (tempo, forma geométrica e rugosidade) não devem ser determinados separadamente. Por exemplo, a forma geométrica de uma peça requer um tipo de processo, que por sua vez implica um tipo especial de máquina, com um custo associado. Por outro lado, a mesma forma geométrica com outro tipo de rugosidade, pode requerer um tipo de processo de fabrico totalmente diferente. Por conseguinte, os dados fornecidos para a realização do fabrico devem ser incorporados num sistema de análise de custos, com os *inputs* apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: *Inputs* do sistema de estimativa (Jung 2002)

Geometria	Máquina	Ferramenta	Material
Classe Operação	Tipo Número de máquina	Tipo Número Identificação	Tipo Perfil Dimensões

A estes *inputs*, são adicionados o tamanho do lote a produzir, a potência da máquina, o *setup* da máquina, o *setup* por ferramenta e o tipo de fixação (Jung 2002, Taiber 1996). As máquinas-ferramenta utilizadas para o desenvolvimento da estimativa de custos são o centro de maquinagem e o torno CNC que se encontram na oficina do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro. As aplicações de fresagem e furação são realizadas pelo centro de maquinagem, enquanto as de torneamento pelo torno CNC.

Como se tratam de sistemas físicos, existem limitações relativas às condições de corte, características essas do sistema máquina-ferramenta-peça, que são: a força máxima de corte admissível, a temperatura de corte, profundidade, velocidade, avanço, potência, vibração, limites de curso e limitações geradas pela qualidade de peça requerida.

As condições que garantem o funcionamento correto quer da máquina-ferramenta, quer das ferramentas de corte, encontram-se na ficha técnica dos equipamentos (Anexo C). A velocidade de corte e o avanço, para efetuar as operações de maquinagem pretendidas, são obtidos pela consulta do catálogo de ferramentas de corte SANDVIK Coromant. A seleção é feita a partir da geometria a maquinar, do material a maquinar, a qualidade requerida e as limitações do sistema.

3.2. Relações dos parâmetros de maquinagem com o custo

De acordo com o que foi exposto no capítulo 2, na secção 2.3, o custo total de produção de uma unidade CT (€), é:

$$CT = CM + CM_a + DG_f + L + IVA, \quad (3.1)$$

em que CM (€) é o custo de maquinagem, CM_a (€) é o custo do material, DG_f (€) são as despesas gerais de fabrica, L (€) são os custos associados com a logística e IVA o valor dedutível (€) é o custo associado aos impostos (Juneja 2003).

Para se obter o custo de maquinagem, como falado anteriormente, é necessário calcular o tempo de maquinagem. Este é dividido em tempo produtivo e improdutivo (Ferraresi 1969). O tempo produtivo é o somatório do tempo de cada operação T_o (min) (Stephenson e Agapiou 2016). Este é traduzido pela equação (3.2),

$$T_o = t_c + t_v + \frac{t_{et}}{60} + \frac{t_c}{T} \times t_l, \quad (3.2)$$

em que, t_c (min) é o tempo de corte, t_v (min) é o tempo de vazio, t_e (s) é o tempo de aproximação/afastamento da ferramenta ao material de trabalho, T (min) é o tempo de vida da ferramenta, e t_l (min) é o tempo de afiação ou introdução de nova aresta de corte na ferramenta. Neste trabalho, o tempo de aproximação t_e (min) vai ser considerado 0 s para o torneamento e furação, no caso da fresagem, é calculado pela equação (3.3).

$$t_{et} = \frac{D_f}{v_f} \quad (3.3)$$

O tempo em avanço rápido t_v (min), é dado pela equação 3.4.

$$t_v = \frac{L_r}{v_r}, \quad (3.4)$$

em que L_r (mm) a distância percorrida em avanço rápido e v_r (m/min) é a avanço rápido. A velocidade de avanço rápido é obtida pelas especificações da máquina, este valor é muito elevado e, conseqüentemente, t_v , é, em muitos casos, desprezável. Aqui vai ser considerado que t_v é 15% de t_c . Já o tempo improdutivo T_n (min), é dado pela soma dos tempos em que não se remove material (equação 3.5).

$$T_n = t_s \times 60 + \frac{t_{lt} + t_{tf}}{60} + t_r + t_i, \quad (3.5)$$

em que t_s (h) é o tempo de preparação da máquina, t_{lt} (s) é o tempo de carregamento/descarregamento da peça na máquina, t_{tf} (s) é o tempo de troca de ferramenta, t_r (min) é o tempo de reposicionamento da peça e t_i (min) é o tempo de controlo dimensional da peça. O tempo de *setup*, é a soma do tempo de configuração da máquina-ferramenta e de cada ferramenta utilizada. Assim sendo t_s (h) é dado pela equação (3.6).

$$t_s = t_{sm} + \sum_{i=1}^n (t_{st})_i, \quad (3.6)$$

em que t_{sm} (h) é o tempo de configuração da máquina e t_{st} (h) é o tempo de configuração de cada ferramenta utilizada no fabrico. Na Tabela 5, está representado alguns tempos de *setup* para algumas máquinas-ferramenta.

Tabela 5: Tempos de *set-up* para algumas máquinas-ferramentas (Adaptado de Singal 2008)

Máquina-Ferramenta	Tempo de <i>set-up</i> , Máquina (s)	Tempo de <i>set-up</i> , Ferramenta (s)
Torno convencional	4300	800
Torno Semi-automático	1620	720
Torno CNC	1800	540
Centro de maquinagem	2500	180
Fresadora Vertical	5500	-
Broca manual	860	-

A Tabela 6 representa o t_{lt} traduzido pelo peso do material a maquinar para alguns sistemas de fixação.

Tabela 6: Tempo em segundos de carregamento/descarregamento de diferentes pesos de peças de trabalho (Adaptado de Singal 2008)

Sistema de fixação	Peso da Peça de trabalho (kg)			
	0-0,2	0,2-4,5	4,5-14	14-27
Bucha universal	16	23	32	53
Bucha de quatro grampos	34	41	50	71
Prensas	16	19	24	40
Gabarito	26	33	42	-
Mesa Magnética	3	5	8	-

O tempo de troca de ferramenta t_{tf} (min), no caso de CNC, é o tempo que decorre quando a ferramenta viaja até à torreta e é substituída por uma nova ferramenta, este tempo é expresso em 3.7.

$$t_{tf} = N_f \times t_f \quad (3.7)$$

em que N_f é o numero de ferramentas utilizada e t_f (min) é o tempo de troca de ferramenta na torreta. Posto isto, o tempo de produção por peça, ou, tempo total por peça T_t (min), para um lote de N peças, é dado pela equação 3.8.

$$T_t = T_n + \sum_{i=1}^n T_{oi} \quad (3.8)$$

O custo de maquinagem CM , é calculado pelo produto do custo da máquina e da mão de obra com os tempos improdutivos, adicionando, também os custos por operação (equação 3.9), (Stephenson e Agapiou 2016).

$$CM = (C_m + C_L) \frac{T_n}{60} + \sum_{i=1}^n C_{oi}, \quad (3.9)$$

em que C_m (€/h) é o custo associado à máquina, C_L (€/h) o custo da mão de obra, T_n (min) o tempo não produtivo e C_o (€/h) é o custo por operação. Este último é o somatório do custo de todas as operações de maquinagem (equação 3.10).

$$C_o = (C_m + C_L) \left(t_c + t_v + \frac{t_{et}}{60} \right) 60 + \left(\frac{t_c}{T} \right) [60(C_m + C_L)t_l + C_F], \quad (3.10)$$

em que C_f (€) o custo da ferramenta. O método para estimar os custos de uma ferramenta depende do tipo de ferramenta usada (Winston e Knight 2006). Para ferramentas que podem ser novamente afiadas-ferramentas inteiriças- a expressão seguinte, pode ser utilizada para estimar o custo com a ferramenta C_F , em €.

$$C_F = \frac{C_{te}}{na} + C_f, \quad (3.11)$$

em que C_{te} (€) é o custo da ferramenta, na é o número de novas afiações possíveis e C_f (€) é o preço de compra da ferramenta. Quando se trata de pastilhas de corte, o custo da ferramenta é expresso pela equação 3.12 (Winston and Knight 2006).

$$C_F = \frac{C_{te}}{nt} + C_f, \quad (3.12)$$

em que nt é o número de arestas de corte por pastilha. Reescrevendo a expressão 3.11, fica:

$$C_o = C_1 + C_2, \quad (3.13)$$

em que $C_1 = (C_m + C_L) \left(t_c + t_v + \frac{t_{et}}{60} \right) 60$ caracteriza o custo da remoção de material e $C_2 = \left(\frac{t_c}{T} \right) [60(C_m + C_L)t_l + C_F]$ o custo da ferramenta. O custo de maquinagem CM_p (€) por peça num lote de N peças, é dado pela equação 3.14.

$$CM_p = (C_m + C_L) \left(\frac{t_s}{N} + t_{lt} + t_{tf} \times N_f + t_r + t_i \right) + \sum_{i=1}^n C_{oi}, \quad (3.14)$$

escrito de outra forma, a equação 3.14 fica:

$$CM_p = C_3 + \sum_{i=1}^n C_{oi}, \quad (3.15)$$

em que $C_3 = (C_m + C_L) \left(\frac{t_s}{N} + t_{lt} + t_{tf} \times N_f + t_r + t_i \right)$ caracteriza o custo de máquina parada. Para se obter o custo total de produção é adicionado a este o custo do material e das despesas gerais de fábrica. O CM_a (€) é dado por:

$$CM_a = V_p \times \rho \times C_{ma} \times 1000, \quad (3.16)$$

em que V_p (cm³) é o volume do material, ρ (g/cm³) é a densidade do material, C_{ma} (€/kg) é o preço do material por kg (Shehab e Abdalla 2001). O volume V_p corresponde ao perfil a partir do qual se vai obter a geometria desejada.

As despesas gerais de fabrico, são somadas aos custos de maquinagem e de material, sob a forma de margem percentual (como se viu no capítulo 2, secção 2.3.3) que engloba custos administrativos, logísticos, *marketing*, entre outros.

3.3. Informação necessária para o sistema que avalia os custos


Para desenvolver um ambiente integrado, capaz de interpretar os dados introduzidos e gerar uma estimativa de custo, recorreu-se ao Microsoft Excel. No programa, são criadas folhas de cálculo que permitem relacionar os tempos obtidos com o custo, a partir da seleção dos parâmetros de corte, para as operações de fresagem, torneamento e furação. Essas folhas são apresentadas no Anexo A.

3.3.1. Desenvolvimento do ambiente integrado para estimar custos

Inicialmente, cria-se a relação entre algumas geometrias base e as operações mais comuns para as maquinar. Seguidamente, associa-se a ferramenta de corte frequentemente mais utilizada para cada geometria base/operação. Ao conjunto geometria base/operação/ ferramenta, é adicionada a máquina ferramenta com indicação da qualidade mínima e máxima possível de obter com o equipamento. Aqui também é apresentada a gama de rugosidades utilizadas pela norma ISO. A folha seguinte, apresenta as dimensões de comprimento para cada geometria base, permitindo o cálculo do volume que se pretende remover. A descrição das características técnicas das ferramentas de corte utilizadas nas operações de maquinagem, são descritas pelo utilizador e armazenadas numa folha de cálculo. Como na oficina do departamento se trabalha, sobretudo, com as máquinas CNC, é estabelecida uma folha de cálculo tanto para o torno CNC, como para o centro de maquinagem onde se introduzem os parâmetros de corte para cada operação, obtendo-se o tempo de maquinagem e o custo relativo à operação e à ferramenta. Por fim, é criada outra folha de cálculo que incorpora os custos por operação com os restantes custos de produção (improdutivos, material, etc) indicando assim o preço por peça obtido.

3.3.2. Desenvolvimento da folha orçamental para estimar custos

Primeiramente, criou-se uma folha de cálculo que armazena todos os dados do cliente. Seguindo o mesmo modelo, gera-se uma folha com os detalhes do produto a fabricar e, com estas duas informações, surge a folha final de orçamento. A figura 7, ilustra a folha de orçamento proposta para os casos de estudo, que serão apresentados no Capítulo 4.



universidade de aveiro

DADOS PERSONALIZADOS PARA PREENCHIMENTO DO FORMULÁRIO

>> CÓDIGO DO CLIENTE	CLI001	CLIQUE PARA INTRODUIZIR TODOS OS CLIENTES
>> LOCALIDADE		
>> DATA DA EMISSÃO	11-12-17	
>> LINHA #1	[nome do vendedor]	
>> LINHA #2	[digite aqui todas as formas de contato: telefones, email]	

DADOS DO CLIENTE
 JOSÉ - 910225534 - JOSEAFERREIRA@UA.PT
 JOSÉ (0000.000.00)

ORÇAMENTO Nº.

20171211153134

DETALHE DO PEDIDO						
COD	DESCRIÇÃO DO PRODUTO	QTD	UND	VL. UNIT.	VL. TOTAL	
PRD001	P1	1	KG	78,44 €	78,44 €	INTRODUZIR MAIS
PRD002	P2	1	KG	90,69 €	90,69 €	INTRODUZIR MAIS
PRD003	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD004	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD005	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD006	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD007	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD008	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD009	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD010	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD011	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD012	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD013	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD014	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD015	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD016	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD017	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD018	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD019	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD020	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD021	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD022	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD023	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD024	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
PRD025	0		0	0,00 €	0,00 €	INTRODUZIR MAIS
VALOR TOTAL DO PEDIDO					169,12 €	
<i>DESCONTO</i>				5,0%	8,46 €	
TOTAL PARCIAL (SEM FRETE)					160,66 €	
CUSTOS COM TRANSPORTE (FRETE)					0,00 €	
ORÇAMENTO FINAL					160,66 €	

Figura 7: Folha de orçamento proposta (Anexo A)

4. Casos de estudo

Depois de desenvolvida a metodologia para calcular o preço de um item, surge este capítulo com o objetivo de aplicar a mesma. Para tal, criaram-se dois casos de estudo. Estes casos, são uma peça cilíndrica e outra prismática, a serem efetuadas no torno CNC e no centro de maquinagem, respetivamente. De forma a simular os tempos de fabrico, recorreu-se a um sistema CAM, o *Autodesk Fusion 360*.

4.1. Caracterização dos casos de estudo

A peça da Figura 8a, designada por P1, será produzida pelo torno CNC e a peça da Figura 8b, designada por P2, como é prismática e requer furação, será produzida pelo centro de maquinagem CNC.

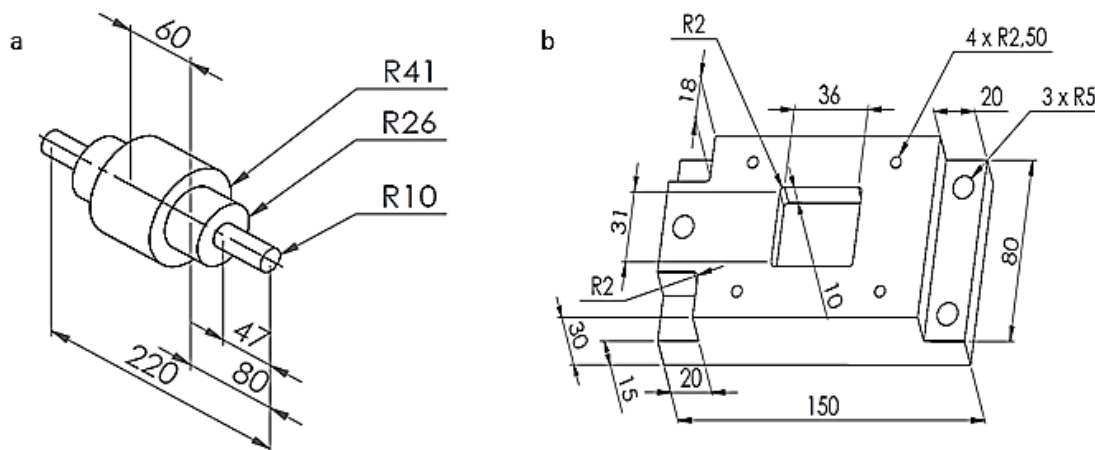


Figura 8: Representação das peças a maquinar: (a) peça P1 (b) peça P2

Ambas as peças são obtidas a partir de um semi-produto cilíndrico e prismático (P1 e P2, respetivamente). Os semi-produtos, estão descritos na Tabela 7. Considera-se, que o fornecedor já efetuou a operação de corte nas suas instalações, cuja função é separar a peça inicial do restante corpo. Na peça P1, dá-se a redução de secção até à pretendida, ao longo de um determinado comprimento. Para isso, recorre-se a operações de torneamento. Por sua vez, na peça P2 executa-se operações de fresagem e furação.

Tabela 7: Descrição de semi-produtos utilizados (AÇOS RAMADA 2013)

Peças	Designação do material DIN	Massa específica (g/cm ³)	Dimensões de perfil (mm)	Peso (Kg)	Preço (€/Kg)
P1	C45E	7,84	Ø85x222	10	2,61
P2	C45E	7,84	80x33x150	3,1	2,99

Para cada geometria base, que se pretende obter tanto na peça P1 como P2, identificou-se o conjunto composto de máquina-ferramenta, ferramenta de corte e operação de maquinagem (entidade). Estas entidades, são agrupadas em quatro classes (Figura 9). A primeira classe, inclui as peças cilíndricas, maquinadas sobretudo por operações de torneamento (peça P1). A seguinte, é referente às prismáticas, obtidas maioritariamente por operações de fresagem plana (peça P2). A terceira, inclui novamente características prismáticas, mas obtidas por fresagem de topo e lateral, como caixas internas e cantos (peça P2). Por fim, a quarta é associada às operações de revolução, geradas pela furação (peça P2), (Jung 2002).

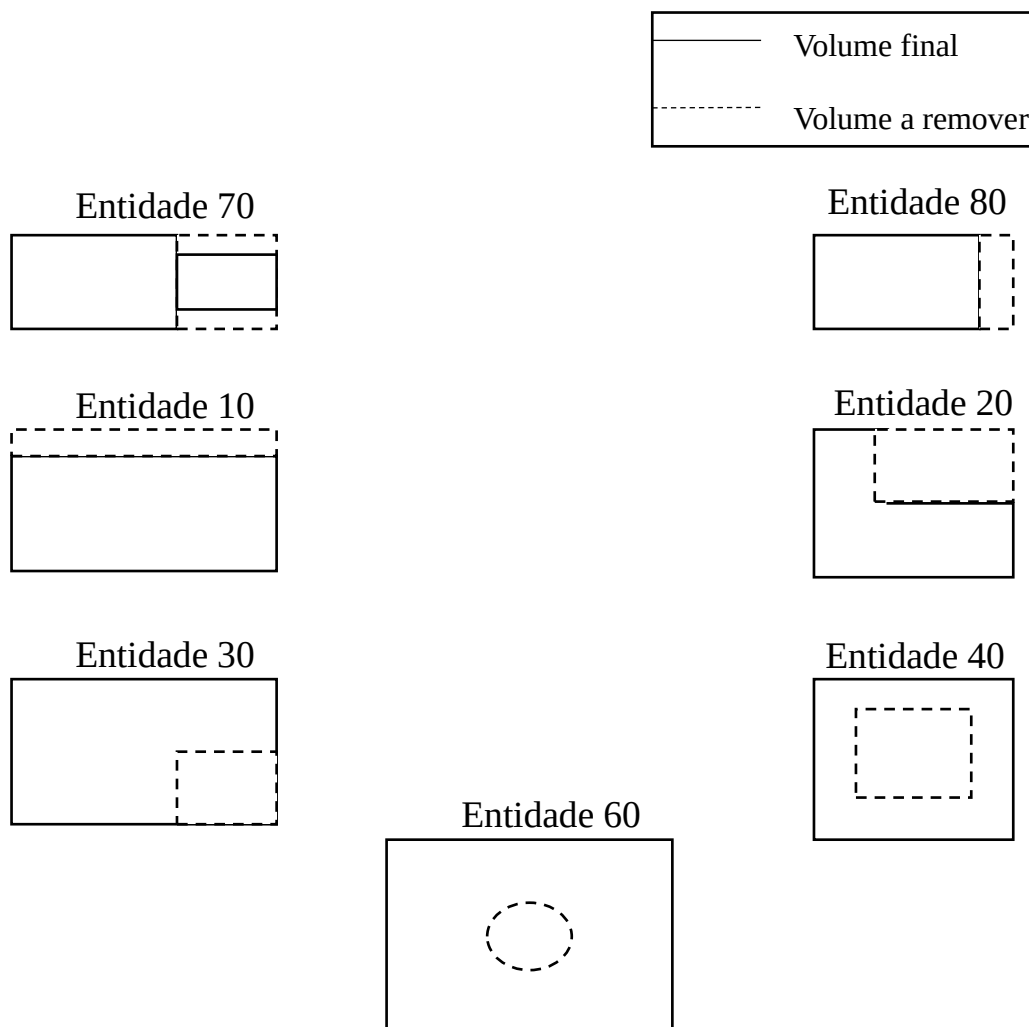


Figura 9: Geometrias base e respectivas entidades das peças a maquinar. Adaptado de Jung 2002

A Tabela 8, associa as entidades encontradas na análise de ambas as peças, ao conjunto operação, ferramenta de corte e máquina.

Tabela 8: Associação das geometrias bases encontradas à operação, ferramenta e máquina

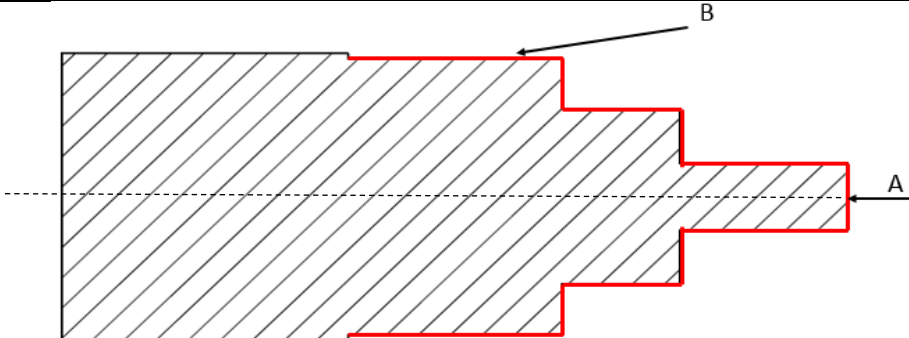
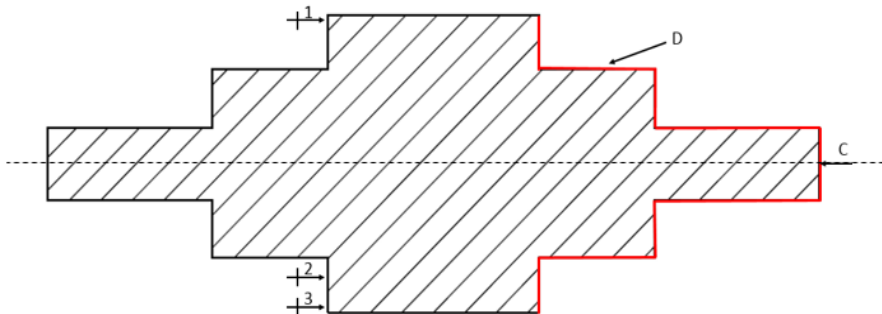
Entidade	Operação	Ferramenta	Máquina
P1			
70	Tornear	Pastilha para torno	Torno CNC
80	Facejamento	Pastilha para torno	Torno CNC
P2			
10	Fresagem plana	Fresa de pastilhas	Centro de maquinagem
20	Fresagem plana	Fresa de pastilhas	Centro de maquinagem
30	Fresagem de topo e lateral	Fresa inteiriça de topo direito	Centro de maquinagem
40	Fresagem de topo e lateral	Fresa inteiriça de topo direito	Centro de maquinagem
60	Furação	Broca	Centro de maquinagem

4.1.1. Maquinagem de P1

As operações de maquinagem desta peça, foram selecionadas consoante a entidade que cada geometria base representa (Anexos A).

A maquinagem da peça P1, é dividida em duas fases (Tabela 9). A primeira fase, corresponde a uma operação de facejamento, seguida de torneamento. Para a segunda fase, a máquina é parada e o operador roda a peça e posiciona a parte já maquinada na bucha, representado pelos apoios 1, 2 e 3 (ver Tabela 9).

Tabela 9: Proposta de sequência de maquinagem para a peça P1

Peça: P1		Material – C45E	
Fase 10			
Máquina: Torno CNC			
Desenho			
			
Operações:		Ferramentas:	
Facejamento Face A		Pastilha para torno	
Torneamento Face B		Pastilha para torno	
Fase 20			
Máquina: Torno CNC			
Desenho			
			
Facejamento Face C		Pastilha para torno	
Torneamento Face D		Pastilha para torno	

Os dados de corte para cada operação, no que diz respeito à velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, foram obtidos a partir das sugestões do catálogo de ferramentas Sandvik Coromant (Anexos B). Para obter estes parâmetros, teve-se em consideração: o material a maquinar de classe P (classe esta que representa os aços de construção), velocidade máxima de rotação do equipamento utilizado- 4500 rpm -e a geometria base que se pretende maquinar em cada operação (Anexos A). Com o volume a remover (Tabela 10), pela expressão 2.2 chega-se à taxa de remoção de metal (Tabela 11). Por fim, o controlo dimensional de cada operação é realizado por um paquímetro.

Tabela 10: Volume a remover face à entidade em questão de P1

Nº	Entidades (Anexo A)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	L (mm)	V (cm ³)
1	81	85	-	1,5	8,5
2	71	85	82	140	24
3	71	82	52	47	284
4	72	82	52	-	3
5	71	52	20	33	85
6	72	52	20	-	1,8
7	81	85	-	1,5	8,5
8	71	85	52	47	283
9	72	85	52	-	3,5
10	71	52	20	33	85
11	72	52	20	-	1,8

Tabela 11: Ficha de Fase proposta para P1 (SANDVIK - Ferramenta para torneamento 2017)

Peça:P1			Máquina: Torno CNC						Setor: Torneamento	
Material: C45E			Dispositivo de aperto: Bucha de 3 grampos							
Operações de Maquinagem			Dados de corte						Ferramenta	
Nº	Ref	Entidade	Vc	n	fz	Vf	ap	Q	Controlo	
1	A	81	284	1064	0,707	752	1,5	301	Paquímetro	
2	B	71	333	1270	0,350	445	1,5	175	Paquímetro	
3	B	71	333	1583	0,350	554	7,5	874	Paquímetro	
4	B	72	333	1583	0,350	554	5	583	Paquímetro	
5	B	71	333	2946	0,350	1031	3,2	373	Paquímetro	
6	B	72	333	2946	0,350	1031	2,4	280	Paquímetro	
7	C	81	284	1064	0,707	742	1,5	301	Paquímetro	
8	D	71	333	1548	0,350	542	5,5	641	Paquímetro	
9	D	72	333	1548	0,350	542	4	466	Paquímetro	
10	D	71	333	2946	0,350	1031	3,2	373	Paquímetro	
11	D	72	333	2946	0,350	1031	2,4	280	Paquímetro	

Como a máquina-ferramenta se trata de um torno CNC e é utilizada apenas uma ferramenta, ao consultar a Tabela 5, t_{sm} e t_{st} , são 0,5 e 0,15 h, respetivamente. Finalizando, pela equação 3.6, t_s é


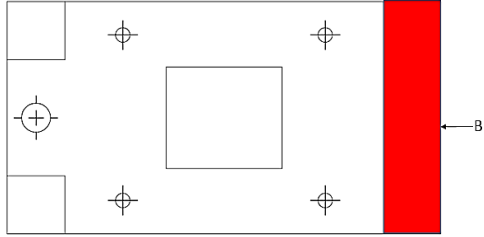
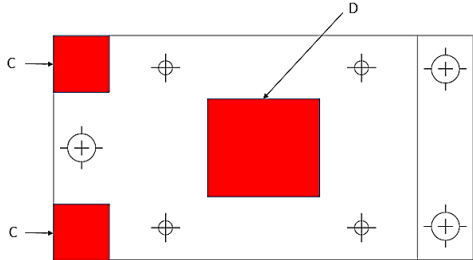
de 0,65 h. Visto que o sistema de fixação é uma bucha de 3 grampos, e a peça pesa 10 kg, pela consulta da Tabela 6, o tempo de carregamento e descarregamento t_{lt} , é de 34 s. Como só é utilizado uma ferramenta, t_{tf} não existe. Entre fases, estima-se que o tempo que decorre entre a paragem do sistema e o início da fase seguinte é de 3 min.

4.1.2 Maquinagem de P2

As operações de maquinagem para esta peça foram também seleccionadas consoante a entidade que cada geometria base representa (Anexos A).

A peça P2, é obtida através de operações de desbaste, acabamento e furação. A sequência de maquinagem adotada, é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12: Sequência de maquinagem proposta para a peça P2

Peça:		Material – C45E
Fase 10		
Máquina: Centro de Maquinagem		
Operações:	Ferramentas:	Desenho
Facejamento Face A	Fresa de pastilhas	
Desbaste e acabamento da Face B	Fresa de pastilhas	
Desbaste e Acabamento Face C e D	Fresa inteiraça de topo e lateral	

Furação E e F	Broca	
Furação G	Broca de ponto	

Novamente, os dados de corte para cada operação, foram obtidos pelo catálogo de ferramentas Sandvik (Anexos B). Teve-se em conta a classe de material a maquinar (classe P), as limitações da máquina- velocidade máxima de fuso de 8100 rpm- e a geometria base a obter (Anexos A). O volume a maquinar está representado na Tabela 13 e as variáveis para o caracterizar na Figura 10. Os parâmetros, que permitem obter a taxa de remoção de metal (pela equação 2.5 para fresagem e 2.7 para furação), são apresentados na Tabela 14. O controlo dimensional, é efetuado por paquímetro e micrómetro, no caso das exigências de rugosidade desta peça.

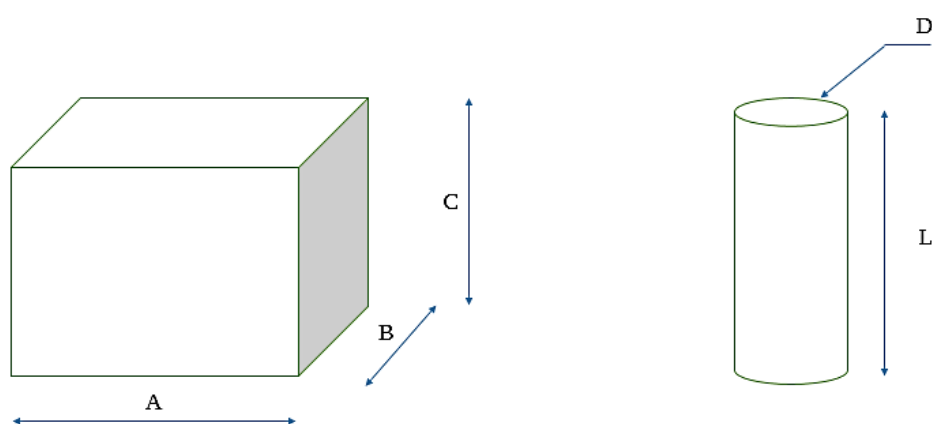


Figura 10: Variáveis para calcular o volume removido de material

Tabela 13: Volume a remover face à entidade em questão de P2

Nº	Entidades	D_f (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	L (mm)	Nº repetições	V (cm³)
1	11	100	150	80	3	-	-	1	36
2	21	38	19,5	80	15	-	-	1	23,4
3	22	38	0,5	80	15	-	-	1	0,6
4	31	15	19,5	20	15	-	-	2	11,6
5	33	4	0,3	20	15	-	-	2	0,18
6	41	15	-	-	-	30	15	1	7
7	42	15	38	33	10	-	-	1	5,5
8	44	4	-	-	-	-	-	-	1,5
9	61	10	-	-	-	10	30	1	2,4
10	61	10	-	-	-	10	15	2	2,4
11	61	5	-	-	-	5	10	4	0,8

Tabela 14: Ficha de Fase proposta para P2 (SANDVIK - Ferramentas rotativas 2017)

Peça:P2			Máquina: Centro de maquinagem							Setor: Fresagem	
Material: Ck-45			Dispositivo de aperto: Prensa								
Operações de Maquinagem			Dados de corte							Ferramenta	
Nº	Ref	Entidade	Vc	n	fz	Vf	ap	Zn	Q	Controlo	
1	A	11	197	627	0,453	1757	3	7	477	Paquímetro	
2	B	21	269	2249	0,120	1991	15	4	316	Paquímetro	
3	B	22	292	2441	0,442	1710	15	4	31	Micrómetro	
4	C	31	172	3652	0,090	1835	15	3	222	Paquímetro	
5	C	33	101	8000	0,082	1710	15	4	12	Micrómetro	
6	D	41	184	3907	0,045	2571	2,5	3	20	Paquímetro	
7	D	42	172	3652	0,090	4125	10	3	148	Paquímetro	
8	C D	44	101	8041	0,082	4125	10	4	26	Micrómetro	
9	E	61	180	5732	0,240	1440	30	-	108	Paquímetro	
10	F	61	180	5732	0,240	1440	15	-	108	Paquímetro	
11	G	61	128	8100	0,180	1440	10	-	29	Paquímetro	

O t_{sm} para o centro de maquinagem, pela Tabela 5, é de 0,7 h. Adicionando, o tempo de t_{st} relativo a 6 ferramentas, t_s , pela equação 3.6, é de 1 h.

O sistema de fixação utilizado, é uma prensa manual e, como o perfil a maquinar tem peso de 3,1 kg, pela Tabela 6, estima-se que t_{lt} , é 19 s. Relativamente ao tempo de troca de ferramenta, utilizando o centro presente no departamento, observou-se que para duas ferramentas posicionadas ao lado uma

da outra, que o tempo de troca de ferramenta na torreta, é de 12 s. Nesta sequência, utilizam-se 6 ferramentas diferentes, logo t_{tf} é 72 s. Visto que esta peça apresenta requisitos de exigência superficial, o t_i , é de 3 min.

Na peça P2, o tempo de vida de cada ferramenta, é obtido pela conjugação da velocidade de corte e do avanço (Anexos B). Esse valor, assim como o seu preço, estão descritos na Tabela 15. Aqui, também se considera que o tempo de troca de aresta de corte ou, no caso de afiamento, é de 3 min. As ferramentas utilizadas para maquinar tanto para P1, como para P2, estão descritas na tabela 4.9.

Tabela 15: Ferramentas utilizadas do catálogo da Sandvik Coromant

Código de Ferramenta Pelo fornecedor	Nº	Material	T (min)	C_f (€)
P1				
CNMG 19 06 08-PR 4325	T01	HC cobertura CDV Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN	15	25,30
P2				
345-100C8-13M	T01	-	-	793
345R-1305M-PH 4230	-	HC cobertura CDV Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN	36	162
RA390-038M32-17H	T02	-	-	324
R390-17 04 16M-PH 4230	-	HC cobertura CDV Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN	36	162
2N342-1500-PC 1730	T03	HC	37	125
2P340-0400-PA 1630	T05	HC	37	67,10
860.1-1000-031A1-PM 4234	T06	HC	87	125
860.1-0510-019A1-PM 4234	T07	HC	55	88,50

4.1.2. Simulação com sistema CAM

O sistema CAM, como visto no capítulo 2, permite simular e otimizar o processo de fabrico de uma peça. Neste caso, o objetivo do sistema utilizado é simular o tempo de maquinagem das peças P1 e P2. Com este sistema, é possível visualizar a cinemática criada entre a peça e a ferramenta de corte, durante a geração de apara.

Para simular o tempo de maquinagem pelo programa, utilizaram-se exatamente os mesmos parâmetros de corte e características de ferramenta, para se obter os tempos de maquinagem e comparar com os obtidos teoricamente. Uma análise mais detalhada sobre a utilização do programa, encontra-se no Anexo C. As operações efetuadas no programa, são apresentadas nas Tabela 16 e 17.

Tabela 16: Operações para a peça P1


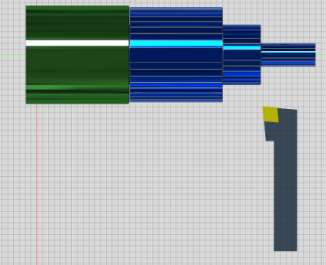
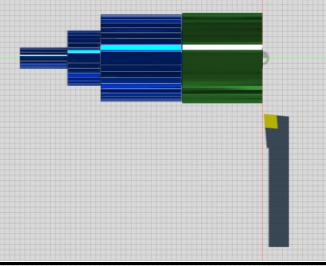
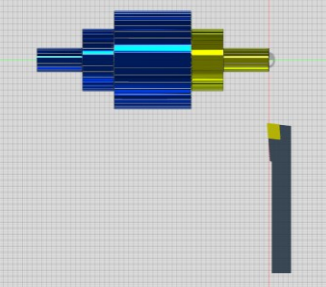
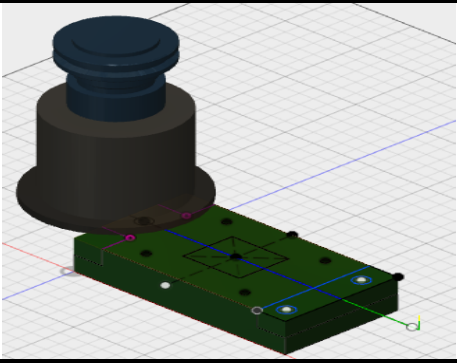
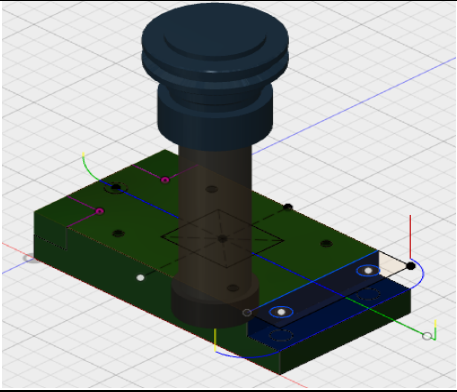
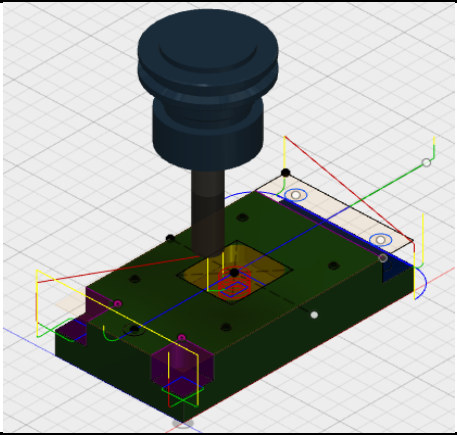
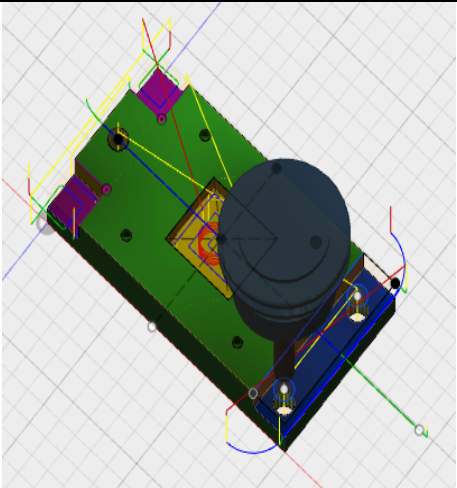
<ul style="list-style-type: none"> • Facejamento Face 			
<ul style="list-style-type: none"> • Torneamento Face 			
<ul style="list-style-type: none"> • Facejamento Face 			
<ul style="list-style-type: none"> • Torneamento Face 			

Tabela 17: Operações para a peça P2

<ul style="list-style-type: none"> • Facejamento Face 	
<ul style="list-style-type: none"> • Desbaste acabamento 	
<ul style="list-style-type: none"> • Desbaste e Acabamento 	
<ul style="list-style-type: none"> • Furação 	

5. Análise e Discussão de resultados

Neste capítulo, serão apresentados os valores obtidos para os dois casos propostos no capítulo anterior, relativamente ao tempo de maquinagem e custo. Depois de apresentados os valores, será realizada uma análise e discussão, que permitirá, chegar às conclusões que serão apresentadas no capítulo 6. Serão avaliados, três tamanhos de lote: 1, 30 e 300 unidades, de forma a analisar a variação do tempo de maquinagem e o custo. Com base nos orçamentos disponibilizados por três empresas, pretende-se comparar os custos fornecidos pelas empresas com os valores obtidos teoricamente.

5.1. Análise de tempo de maquinagem

Os tempos para as operações, obtidos através da equação 3.2, estão descritos na Tabela 18.

Tabela 18: Tempos de operação de P1 e P2

P1				P2			
Nº	t_c (min)	t_v (min)	T_o (min)	t_c (min)	t_v (min)	t_{et}^* (min)	T_o (min)
1	0,03	0	0,04	0,13	0,02	0,05	0,21
2	0,14	0,02	0,19	0,11	0,02	0,04	0,17
3	0,32	0,05	0,44	0,03	0	0,01	0,04
4	0,01	0	0,01	0,07	0,01	0,02	0,10
5	0,23	0,03	0,31	0,02	0	0,01	0,03
6	0,01	0	0,01	0,38	0,06	0,03	0,54
7	0,03	0	0,04	0,05	0,01	0,02	0,08
8	0,44	0,07	0,60	0,06	0,01	0	0,07
9	0,01	0	0,01	0,03	0	0	0,03
10	0,23	0,03	0,31	0,03	0	0,01	0,04
11	0,01	0	0,01	0,04	0,01	0,01	0,06

*valor obtido pela equação 3.7

A estes tempos, é adicionado os tempos improdutivos (obtidos pela equação 3.5), a partir do qual é possível obter o tempo de maquinagem por peça. Na Tabela 19 estão os valores, que permitirão calcular o tempo total de maquinagem T_t , como se viu no capítulo 3.

Tabela 19: Tempos de maquinagem para P1 e P2

	t_s (h)	t_{lt} (s)	t_{tf} (s)	t_r (min)	t_i (min)	t_l (min)	$\sum_{i=1}^n t_{eti}$ (s)	$\sum_{i=1}^n T_{oi}$ (min)	T_t (min)
P1	0,65	32	0	3	0	3	0	1,95	44,7
P2	1	19	72	0	3	3	11	1,38	65,9

Na Figura 11, é possível verificar a influência dos sistemas de controlo numérico para ambas as peças. O tempo da operação, é o que representa maior percentagem face aos outros tempos. Isto quer dizer que os sistemas CNC são uma opção viável, visto que apresentam grande eficiência. Neste caso, 72% na peça P1 e 48% na P2. A peça P2 tem uma percentagem menor devido ao elevado número de ferramentas utilizadas no seu fabrico, conduzindo a um maior tempo de troca de ferramenta e, por conseguinte, elevando os tempos improdutivos da maquinagem.

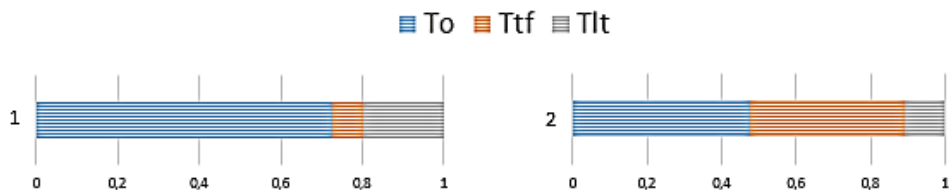


Figura 11: Tempo de maquinagem utilizando CNC. Esquerda P1 e direita P2

5.1.1. Tempo de corte dado pelo *software* CAM

Os valores de tempo de corte por operação obtidos pelo *Autodesk Fusion 360*, estão descritos na Tabela 20. Comparando estes valores com os obtidos teoricamente, é possível verificar se a utilização deste *software* é aceitável.

Tabela 20: Tempos de corte por operação obtidos para ambas as peças, pelo *Autodesk Fusion 360*

P1		P2	
Operação	Tempo (s)	Operação	Tempo (s)
Facejamento A	1	Facejamento A	7
Torneamento B	49	Desbaste B	6
Facejamento C	1	Acabamento B	1
Torneamento D	43	Desbaste C	12
		Desbaste D	23
		Acabamento C e D	9
		Furação E e F	7
		Furação G	5
Total (min)	1,5		1,2

Como se verifica pela Tabela 21, a diferença do tempo de corte para a peça P1 é de apenas 0,1 e 0,3 min para a peça P2. Posto isto, considera-se que os valores apresentados pelo *software* são satisfatórios.

Tabela 21: Comparação dos valores do *software* com os calculados teoricamente em min

P1		P2	
Fusion 360	Teoricamente	Fusion 360	Teoricamente
1,5	1,4	1,2	0,9

Na Figura 12, está representada a variação do tempo de maquinagem por peça, tanto de P1 como de P2, à medida que o tamanho de lote N aumenta. Pela análise do gráfico, verifica-se que existe um decréscimo acentuado do tempo total por peça, com o aumento do número de peças a produzir. A partir de um certo tamanho de lote, o tempo atinge um valor constante. Esta assintota horizontal deve-se ao facto de o tempo de *setup* da máquina ser dividido pelo número de peças a fabricar, valor esse que irá tender para zero. Para que o gráfico tenha uma leitura mais acessível, recorreu-se a uma escala logarítmica no eixo vertical.

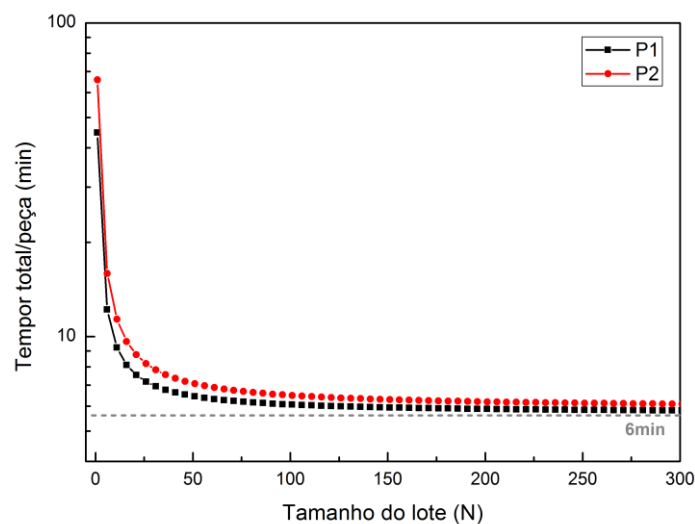


Figura 12: Tempo de maquinagem por peça de P1 e P2 com variação do tamanho de lote

Efetuada a análise para os tamanhos do lote 1, 30 e 300 unidades, tem-se que para uma unidade o tempo total por peça para P1 e P2 é de 44,7 e 65,8 min, respetivamente. No caso de 30 unidades o tempo total é de 7 e 8 min, para P1 e P2, respetivamente. E por fim para 300 unidades o tempo é de 5,8 e 6 min para P1 e P2, respetivamente. De notar que o valor para o lote 30 e 300 unidades, não apresenta alteração significativas, visto este tender para uma assintota horizontal.

Em ambas as peças, separou-se o tempo de *setup* dos tempos improdutivos. Esta decisão foi tomada porque o tempo de *setup* varia com a quantidade de produção, como foi visto no capítulo 3, secção 3.2, enquanto os restantes tempos improdutivos são fixos.

Os gráficos da Figura 13 mostram o peso das parcelas que constituem o tempo de produção para a peça P1. O gráfico da Figura 13a, representa o fabrico de uma peça unitária. Verifica-se que o tempo que representa maior peso é o tempo de *setup*, sendo este de 87%. Também se conclui que para a produção unitária, o tempo de reposicionamento da peça, que é 7%, apresenta maior peso que o tempo de operação, apenas 4%. Para os lotes de 30 e 300, (Figura 13b e Figura 13c, respetivamente) chega-se à mesma conclusão do gráfico da Figura 13: o tempo de *setup* diminui com o conjunto de peças a produzir. Nestes casos, o peso do tempo produtivo aumenta, apesar do tempo improdutivo ser o que tem mais peso.

No caso de P2 (Figura 14), a análise é bastante semelhante à de P1, apenas com a diferença de que na maquinagem desta peça utilizam-se mais ferramenta e, por isso, o peso associado com o tempo de troca de ferramenta é maior, acentuado em produções maiores. Para 300 peças (Figura 14c) esse tempo chega aos 20%.

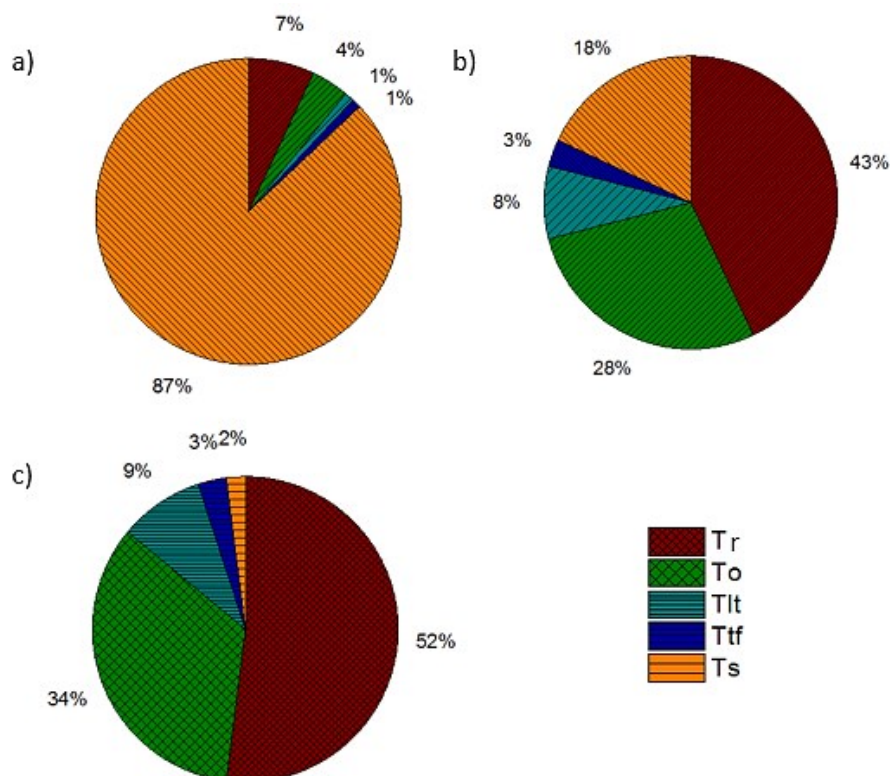


Figura 13: Peso dos diferentes tempos de fabrico da peça P1 a)1 unidade de produção, b)30 unidades de produção, c)300 unidades de produção. Tr-Tempo de reposicionamento da peça, To-Tempo de operação, Tlt-Tempo de carregamento/descarregamento da peça, Ttf-Tempo de troca de ferramenta, Ts-Tempo de *setup*

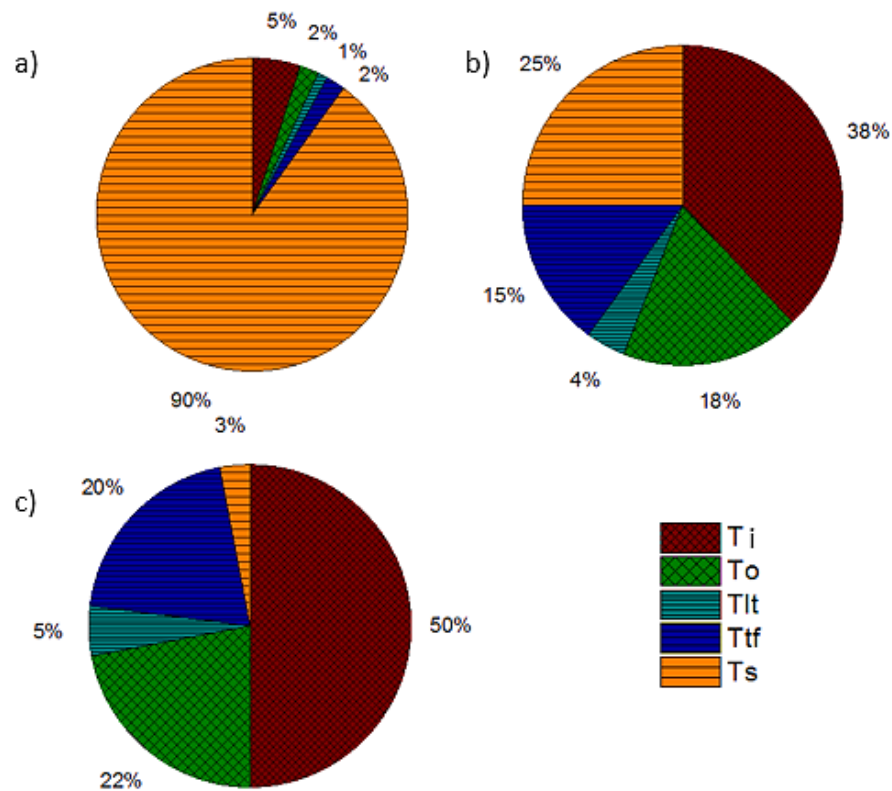


Figura 14: Peso dos diferentes tempos de fabrico da peça P2 para a) 1 unidade de produção, b) 30 unidades de produção, c) 300 unidades de produção. Ti-Tempo de controlo dimensional, To-Tempo de operação, Tlt-Tempo de carregamento/descarregamento da peça, Ttf-Tempo de troca de ferramenta, Ts-Tempo de *setup*

5.2. Análise do custo de maquinagem

Para se obter o custo de operação, tanto para a peça P1 como para a P2, relaciona-se através da equação 3.11 e 3.14, os tempos obtidos na secção 5.1 com os custos associados aos recursos de mão-de-obra, máquina e ferramenta. Neste trabalho, foi considerado que C_L e C_m , são ambos 30 €/h. Os valores calculados, encontram-se descritos na Tabela 22.

Tabela 22: Custo de operação para as peças P1 e P2

P1				P2		
Nº	C_1 (€)	C_2 (€)	C_o (€)	C_1 (€)	C_2 (€)	C_o (€)
1	0,01	0,03	0,04	4,32	0,19	4,51
2	0,06	0,16	0,22	1,12	0,16	1,28
3	0,15	0,37	0,53	0,39	0,04	0,43
4	0,00	0,01	0,01	0,20	0,09	0,30
5	0,11	0,26	0,37	0,01	0,03	0,04
6	0,00	0,01	0,01	1,09	0,47	1,56
7	0,01	0,03	0,04	0,17	0,08	0,24
8	0,21	0,51	0,72	0,01	0,07	0,08
9	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05
10	0,11	0,26	0,37	0,03	0,04	0,07
11	0,00	0,01	0,01	0,02	0,06	0,08

Como C_3 , (custo relativo ao material da peça a maquinar) é um valor tabelado, ou seja, um custo direto, entra na análise para o custo de maquinagem (Tabela 23). A Figura 15 serve, para analisar a variação do custo de fabrico da peça com o tamanho de lote a produzir. Da mesma forma que o tempo tende para um valor constante, também o custo se comporta assim.

Tabela 23: Custos de maquinagem para P1 e P2

Peça	C_m (€)	C_L (€)	$\sum_{i=1}^n C_{1i}$ (€)	$\sum_{i=1}^n C_{2i}$ (€)	$\sum_{i=1}^n C_{0i}$ (€)	C_3 (€)	CM_p (€)	CM_a (€)
P1	30	30	0,68	1,66	2,3	42,7	45	26,2
P2	30	30	7,37	1,27	8,6	64,5	73	9,3

O custo por peça apresenta o mesmo comportamento que o tempo, relativamente ao número de peças a produzir. Enquanto o custo de maquinagem é fixo, o custo improdutivo é variável. Isto porque o custo de preparação é repartido pelo tamanho do lote. Como tal, o custo por peça diminui, como se verifica no gráfico da Figura 15.

Para os tamanhos do lote de 1, 30 e 300 o custo para a peça P1 é 78 €, 37 € e 36 €, respetivamente e para a peça P2 é 91€, 27€ e 25€, respetivamente.

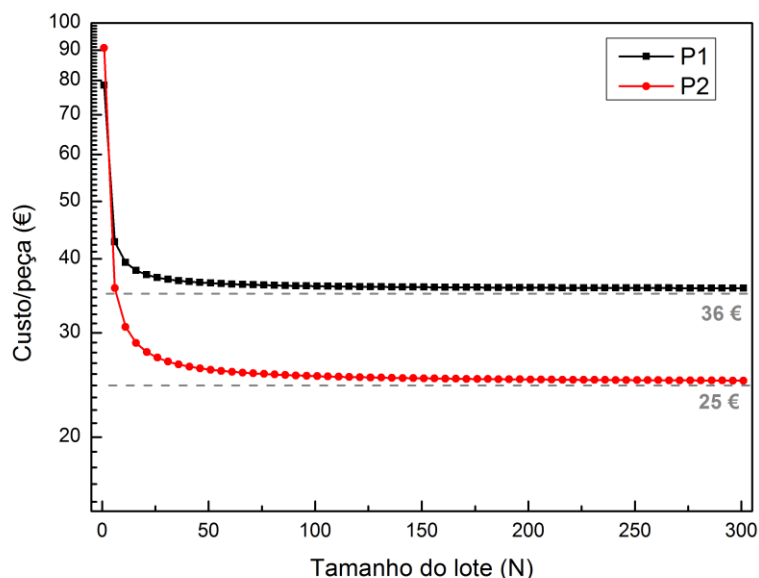


Figura 15: Custo de maquinagem por peça de P1 e P2 com variação do tamanho de lote

As Figura 16 e Figura 17, apresentam o peso dos diferentes custos de fabrico e de material, tanto para P1 como para P2. Para a produção unitária (Figura 16a e Figura 17a), conclui-se que o custo improdutivo é o que apresenta maior peso, 60% e 78%, para P1 e P2, respetivamente, isto porque o custo improdutivo (C3) é o custo que integra o tempo de *setup*, para além de outros.

Outro fator que apresenta um peso significativo na peça P1 é o material. Para produções de 30 unidades (Figura 16b) este valor tem um peso maior, de 78%, que o custo improdutivo, de 15%. Neste caso, como se utiliza apenas uma ferramenta para a maquinagem deste peça, o peso deste recurso é de apenas 2%. Entretanto, o custo das operações de maquinagem aumenta para 5%. Para 300 unidades, os pesos do custo da fabricação de P1 mantêm-se aproximadamente constantes, concluindo-se assim que a partir de 30 unidades os custos tendem a ser independentes do número de peças a fabricar.

Analisando agora os custos para P2, verifica-se que o peso dos seus recursos varia relativamente de P1. A causa disso é a vista anteriormente (secção 5.1): o número de ferramentas utilizadas é maior. Nesta maquinagem são utilizadas seis ferramentas e, devido a tal, o peso do custo deste recurso é maior, efeito que é visível logo na produção unitária em que o seu peso já toma valores de 9% (Figura 17a). Quando o tamanho de lote é 30 (Figura 17b), toma valores de 30%, sendo o segundo recurso com mais peso, logo a seguir ao custo de material. Como em P1, para 300 peças os custos de P2 tendem para um valor constante, chegando-se à mesma conclusão anteriormente referida.

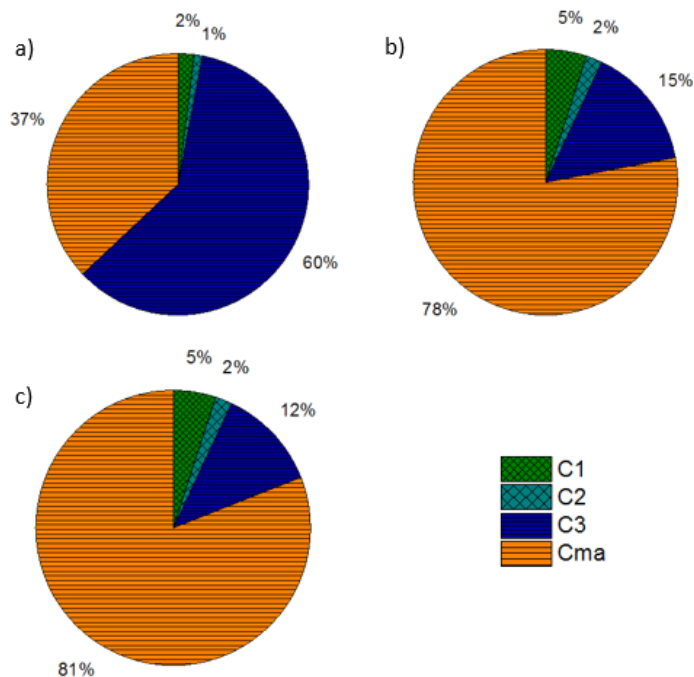


Figura 16: Peso dos diferentes custos de fabrico da peça para P1 a)1 unidade de produção, b)30 unidades de produção, c)300 unidades de produção. C1-Custo de remoção de material, C2-Custo da ferramenta, C3-Custo de máquina parada, Cma-Custo do material

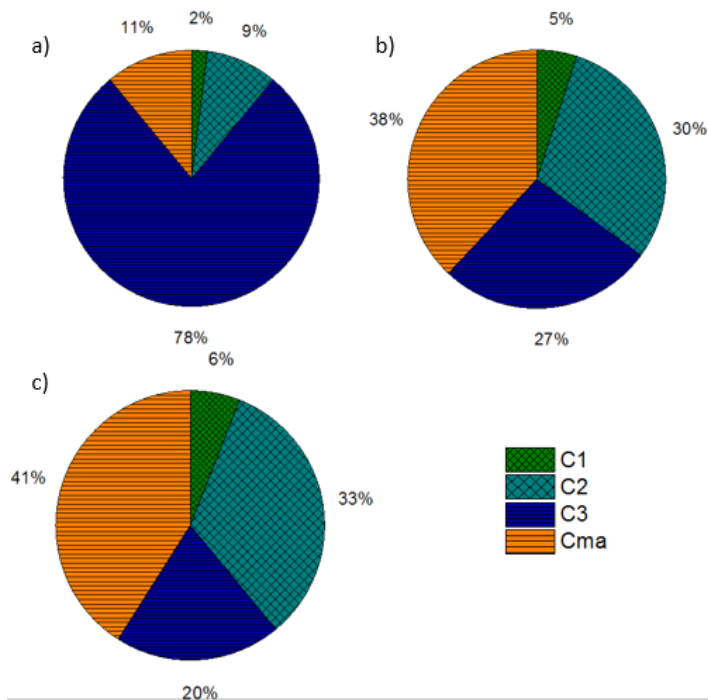


Figura 17: Peso dos diferentes custos de fabrico da peça P2 a)1 unidade de produção, b)30 unidades de produção, c)300 unidades de produção. C1-Custo de remoção de material, C2-Custo da ferramenta, C3-Custo de máquina parada, Cma-Custo do material

5.3. Análise de orçamentos de empresas

Depois dos custos obtidos para os diferentes tamanhos de produção, decidiu-se solicitar um orçamento para as duas peças a 3 empresas que trabalham no ramo da metalomecânica, (empresa A, B e C), com o intuito de se perceber se os valores fornecidos são aceitáveis. De notar que apenas a empresa C forneceu o preço para um tamanho de produção de 300 peças. O orçamento dado pela empresa A, B e C são representados nas três tabelas seguintes, respetivamente.

Tabela 24: Preço em € + IVA por unidade da empresa A

Peça	Tamanho do lote		
	1	30	300
P1	65	60	-
P2	88	80	-

Tabela 25: Preço em € + IVA por unidade da empresa B

Peça	Tamanho do lote		
	1	30	300
P1	75	50	-
P2	50	25	-

Tabela 26: Preço em € + IVA por unidade da empresa C

Peça	Tamanho do lote		
	1	30	300
P1	72,5	60	40
P2	80	62,50	40

Procede-se agora, à comparação entre os valores fornecidos pelas empresas com os valores calculados teoricamente, para o mesmo tamanho de lote, não esquecendo que ao preço calculado na secção anterior não se adicionou os custos associados às despesas gerais, custos logísticos, não-qualidade e inventário. A sua razão de ser é porque estes custos são indiretos e, como tal, não são facilmente calculados. Neste trabalho será adicionada uma taxa que contempla estes custos (referido no capítulo 3), a qual vai ser adicionada ao valor calculado teoricamente. Esta taxa é 10% para as despesas gerais.

O gráfico da Figura 18, permite avaliar como variam os orçamentos propostos pelas três empresas face ao calculado teoricamente para a peça P1. Quando se trata de uma unidade, todas as empresas apresentam valores mais baixos, face ao obtido teoricamente. Para um lote de 30 peças, o valor proposto pelas empresas A e C, é igual, sendo B inferior. Apesar disso, os valores fornecidos são superiores ao calculado teoricamente. Em relação a 300 peças, o valor fornecido pela empresa C é (também como se constatou para o lote de 30 peças) superior ao obtido teoricamente.

Analisando os orçamentos obtidos para a peça P2 com os valores teóricos (Figura 19), o valor teórico para uma unidade é superior aos valores fornecidos pelas empresas A e C, e muito superior ao valor fornecido pela empresa B. No caso de 30 peças, o valor teórico e o da empresa B são aproximadamente iguais, enquanto as restantes empresas apresentam valores superiores. Por fim, para 300 peças, o valor dado pela empresa C é muito superior ao obtido teoricamente.

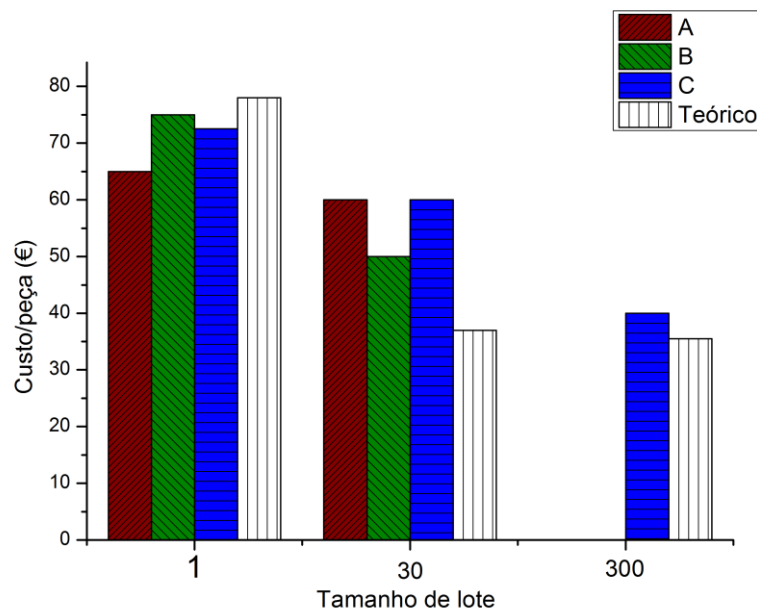


Figura 18: Orçamento proposto pelas empresas e o obtido teoricamente para a peça P1

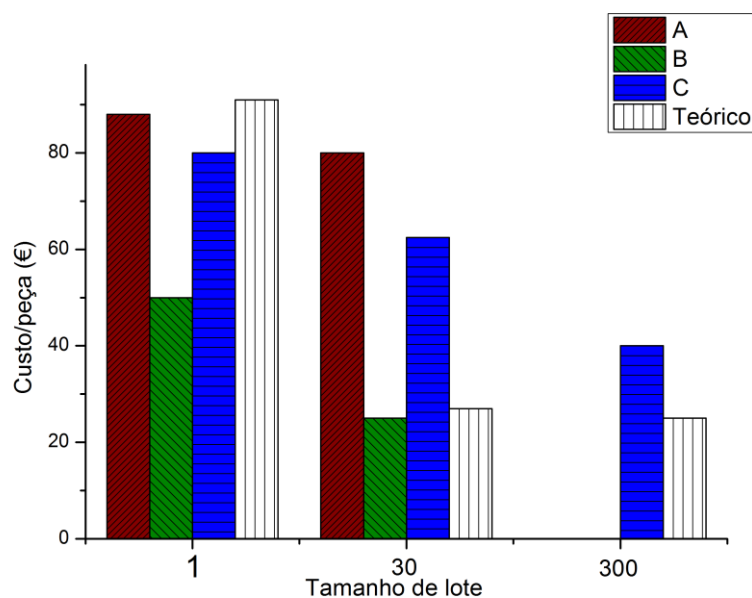


Figura 19: Orçamento proposto pelas empresas e o obtido teoricamente para a peça P2

Depois da análise da concorrência, é possível ajustar o valor a exigir por peça, de forma a obter-se lucro. Para a peça P1, optou-se por acrescentar uma taxa de 20%, para o tamanho de produção de 30 unidades. Sendo assim, o preços por peça, relativamente a P1 é de, 78, 45,6 e 36 €, para os tamanhos de produção de, 1, 30 e 300, respetivamente. Por sua vez, o preço da unidade por peça P2, aumenta 20% para os tamanhos de lote de 30 e 300. Os novos valores para o preço por peça de P2 são, 91, 32,4 e 30 €, para os tamanhos de 1, 30 e 300, respetivamente.

6. Conclusões e trabalho futuro

Nesta dissertação, foram estudados os recursos necessários para a produção de um componente obtido por maquinagem, sendo o tempo de utilização dos equipamentos a variável que afeta o preço do produto. Foi ainda analisado os efeitos provocados no preço por peça, quando se produzem séries de peças.

Relativamente à realização de orçamentos, uma estimativa exata a nível de custos permite compreender a posição de uma empresa face ao mercado em que se encontra. Como foi visto na análise e discussão de dados - capítulo 5 - o preço obtido, teoricamente, pode ser alterado de forma estratégica (aumentado ou diminuído), face aos valores apresentados pela concorrência.

Conclui-se que a sequência de maquinagem tem um papel importante na redução do tempo improdutivo, devendo evitar-se ao máximo a utilização de um número elevado de ferramentas de corte na sequência de maquinagem, porque, como foi referido no capítulo 5, o peso deste recurso (tempo de troca de ferramenta) aumenta com o aumento da produção.

A tecnologia de controlo numérico por computador CNC é uma tecnologia que aumenta a eficiência de utilização da máquina-ferramenta, verificado no capítulo 5, porque durante o tempo de maquinagem, o tempo de remoção de material é o de maior duração. Portanto (apesar do seu elevado investimento de aquisição), esta tecnologia não só é vantajosa para grandes produções, mas também para produções unitárias.

O tempo improdutivo na produção de uma peça é frequentemente superior ao tempo produtivo. O tempo de *setup* da máquina (um dos fatores do tempo improdutivo) é aquele que ocupa maior parte do tempo de produção. Com o aumento do número de peças a fabricar, este valor é dividido pelo número de peças e tende para zero como se viu no capítulo 5. Além disso, também se deve evitar o reposicionamento da peça, uma vez que essa tarefa obriga a mais fases de maquinagem, o que provoca a paragem da máquina e consequentemente, reduz a eficiência do processo, aumentando os tempos improdutivos de maquinagem.

O aumento do tamanho do lote reduz o preço da peça por unidade, porque como se observou, o tempo de *setup* é que apresenta maior duração e, como este diminui com o número de peças a produzir, por consequência, o custo de fabrico diminui. Conclui-se também que o custo de produção tende para um valor limite, ou seja, existe um valor de tamanho de lote a partir do qual este tende para um valor aproximadamente constante. Outro recurso que apresenta um peso significativo com o aumento do tamanho do lote, é o preço do material, que passa a ter mais impacto relativamente a outros fatores.

Por fim, conclui-se que numa empresa, a criação de uma base de dados com entidades, torna facilitadora a seleção da operação, da ferramenta de corte e da máquina-ferramenta, para uma

determinada geometria base, mostrando-se eficiente no auxílio de um profissional com menos experiência na área, na seleção dos parâmetros adequados para maquinar um item.

Como trabalhos futuros, seria interessante desenvolver um *software* munido de uma base de dados, composta por várias entidades e materiais, que relacionassem automaticamente a quantidade de material a remover com o custo. Seria também interessante, a partir do tempo de vida da ferramenta, otimizar parâmetros como a velocidade de corte e o avanço, de forma a se obter o mínimo custo de produção, ou maior taxa de produção.

Referências

- Aderoba, Adeyemi. 1997. "A Generalised Cost-Estimation Model for Job Shops." *Intern. Journal of Production Economics* Vol.53 (n.º3): 257–63. doi:10.1016/S0925-5273(97)00120-5.
- Álvares, Alberto J, João Carlos, and Roman M Lorenzo. 2008. "An Integrated Web-Based CAD / CAPP / CAM System for the Remote Design and Manufacture of Feature-Based Cylindrical Parts." *Journal of Intelligent Manufacturing* Vol.19 (n.º6): 643–59. doi:10.1007/s10845-008-0117-1.
- Asiedu, Y., and P. Gu. 1998. "Product Life Cycle Cost Analysis: State of the Art Review." *International Journal of Production Research* Vol.36 (n.º4): 883–908. doi:10.1080/002075498193444.
- Ben-ariéh, David, David Ben-ariéh, and Li Qian. 2003. "Activity-Based Cost Management for Design and Development Stage Activity-Based Cost Management for Design and Development Stage." *International Journal of Production Economics* Vol.83 (n.º2): 169–83. doi:10.1016/S0925-5273(02)00323-7.
- Completo, A., A. Festas, and J.Paulo Davim. - Tecnologias de Fabrico. 1ª ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2009. ISBN: 978-972-8953-31-7
- Davim, J.Paulo, and A.Esteves Correia.- Maquinagem a Alta Velocidade-Fresagem/CNC. 1ª ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2006 ISBN:972-8953-05-4
- Dewhurst, P, and G Boothroyd. 1988. "Early Cost Estimating in Product Design." *Journal of Manufacturing Systems* Vol.7 (n.º3): 183–91. doi:10.1016/0278-6125(88)90003-9.
- Duverlie, P, and J M Castelain. 1999. "Cost Estimation During Design Step : Parametric Method versus Case Based Reasoning Method." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol.15 (n.º12): 895–906. doi:10.1007/s001700050.
- Elanchezhian, C, Shanmuga Sundar, G., Sunder Selwyn, T. - Computer Aided Manufacturing (CAM). 1ª ed. New Delhi:Firewall Media, 2005. ISBN: 8170087856, 9788170087854
- Fehmi, H, and Patrick Martin. 2006. "Cost Estimation in Mechanical Production : The Cost Entity Approach Applied to Integrated Product Engineering." *Intern. Journal of Production Economics* Vol.103 (n.º1): 17–35. doi:10.1016/j.ijpe.2005.02.016.
- Ferraresi, Dino - Fundamentos Da Usinagem Dos Metais. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1969. ISBN: 9788521208594
- Ficko, M, I Drstven, M Brezo, J Bali, and B Vaupotic. 2005. "Prediction of Total Manufacturing Costs for Stamping Tool on the Basis of CAD-Model of Finished Product." *Journal of Materials Processing Technology* Vol.164: 1327–35. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.02.013.
- Juneja, B. L., Sekhon, G.S., Seth, Nitin - Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools. 2ª ed. New Delhi: New Age International, 2003. ISBN:81-224-1467-2

- Jung, Jong Y. 2002. "Manufacturing Cost Estimation for Machined Parts Based on Manufacturing Features." *Journal of Intelligent Manufacturing* Vol.13 (n.º4): 227–38. doi:10.1023/A:1016092808320.
- Lihui Wang, Ã, Peter Orban, Andrew Cunningham, and Sherman Lang. 2004. "Remote Real-Time CNC Machining for Web-Based Manufacturing." *Robotic and Computer-Integrated Manufacturing* Vol.20 (n.º6): 563–71. doi:10.1016/j.rcim.2004.07.007.
- Liu, Changqing, Yingguang Li, Wei Wang, and Weiming Shen. 2013. "A Feature-Based Method for NC Machining Time Estimation." *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* Vol.29 (n.º4). Elsevier: 8–14. doi:10.1016/j.rcim.2012.10.001.
- Locascio, Angela. 2000. "Manufacturing Cost Modeling for Product Design." *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* Vol.12 (n.º2-3): 207–17. doi:10.1023/A:1008199714982.
- Niazi, Adnan, and Jian S. Dai. 2005. "Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review Product Cost Estimation: Technique Classification." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol.128 (n.º2): 563–75. doi:10.1115/1.2137750.
- Ou-Yang, C., and T. S. Lin. 1997. "Developing an Integrated Framework for Feature-Based Early Manufacturing Cost Estimation." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol.13 (n.º9): 618–29. doi:10.1007/BF01350820.
- Qian, Li, and David Ben-Arieh. 2008. "Parametric Cost Estimation Based on Activity-Based Costing: A Case Study for Design and Development of Rotational Parts." *International Journal of Production Economics* Vol.113 (n.º2): 805–18. doi:10.1016/j.ijpe.2007.08.010.
- Rajkumar, Roy, Petros Souchoroukov, and E Shehab. 2011. "Detailed Cost Estimating in the Automotive Industry: Data and Information Requirements." *Intern. Journal of Production Economics* Vol.133 (n.º2). Elsevier: 694–707. doi:10.1016/j.ijpe.2011.05.018.
- RAMADA, AÇOS. 2013. "TABELA DE PREÇOS-AÇOS ESPECIAIS."
- Rao, R. Venkata. 2011. *Modeling and Optimization of Machining Processes*. doi:10.1007/978-0-85729-015-1.
- Roy, Rajkumar, Petros Souchoroukov, and Terry Griggs. 2008. "Function- Based Cost Estimating." *International Journal of Production Research* Vol.46 (n.º10): 2621–50. doi:10.1080/00207540601094440.
- Ruffo, M, C Tuck, and R Hague. 2006. "Cost Estimation for Rapid Manufacturing – Laser Sintering Production for Low to Medium Volumes." *Journal of Engineering Manufacture* Vol.220 (n.º9): 1417–27. doi:10.1243/09544054JEM517.
- SANDVIK Coromant - "Ferramentas Para Torneamento .",2017
- SANDVIK Coromant - "Ferramentas Rotativas.",2017

- Saptiora, Hendri Dwi Saptioratri Budiono Dwi, G. Kiswanto, and Tresna Priyana Soemardi. 2014. "Method and Model Development for Manufacturing Cost Estimation during the Early Design Phase Related to ..." *International Journal of Technology* Vol.5 (n.º2): 183–92. doi:10.14716/ijtech.v5i2.402.
- Shehab, E .M., and H. S. Abdalla. 2001. "Manufacturing Cost Modelling for Concurrent Product Development." *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* Vol.17 (n.º4): 341–53. doi:10.1016/S0736-5845(01)00009-6.
- Singal, Mridul, Singal, R.K., Singal, Rishi - Fundamentals of Machining and Machine Tools. 1ª ed. New Delhi: I.K. International Publishing House, 2008. ISBN:978-81-89866-66-2
- Souchoroukov, Petros. 2004. "Improvement of Cost Estimating Internal Practice."
- Stephenson, David A., and John S. Agapiou - Metal Cutting Theory and Practice. 3ªed. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. ISBN: 1466587547, 9781466587540
- Taiber, Joachim G. 1996. "Optimization of Process Sequences Considering Prismatic Workpieces." *Advances in Engineering Software* Vol.25 (n.º1): 41–50. doi:10.1016/0965-9978(95)00084-4.
- Winston, A., and Geoffrey Boothroyd Knight. - Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools. 3ªed. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. ISBN: 1574446592, 9781574446593
- Yildiz, Ali R. 2013. "Hybrid Taguchi-Differential Evolution Algorithm for Optimization of Multi-Pass Turning Operations." *Applied Soft Computing Journal* Vol.13 (n.º3). Elsevier B.V.: 1433–39. doi:10.1016/j.asoc.2012.01.012.

Anexos

Anexos A

Folhas de cálculo para obter custos de maquinagem:

1º Folha: Relação de geometrias base com operações

Geometria base	ID	Tipo		ID	Operação	Descrição	Quantidade
Superfície plana	10	Plano		11	Facejamento	Desbaste	1
				12	Facejamento	Acabamento	1
Cantos a 90 graus	20	2 planos secantes associados		21	Fresagem de topo e lateral	Desbaste	1
				22	Fresagem de topo	Acabamento de fundo	1
				23	Fresagem de lateral	Acabamento de parede	1
Cantos	30	3 planos secantes associados		31	Fresagem de topo e lateral	Desbaste	1
				32	Fresagem de topo	Acabamento de fundo	1
				33	Fresagem lateral	Acabamento da parede	2
Caixa interna	40	5 planos secantes associados		41	Fresagem em Hélix	Furação	1
				42	Fresagem de topo e lateral	Desbaste	1
				43	Fresagem de topo	Acabamento de fundo	1
				44	Fresagem lateral	Acabamento de parede	4
Rasgo	50	3 planos secantes associados		51	Fresagem de topo e lateral	Desbaste	1
				52	Fresagem de topo	Acabamento de fundo	1
				53	Fresagem lateral	Acabamento de parede	2
Furo cilíndrico	60	Secante/Passante		61	Furação	Ponto simétrico	1
Superfícies cilíndrica	70	Corte externo		71	Torneamento longitudinal	Desbaste	1
				72	Torneamento frontal	Desbaste	1
				73	Torneamento	Acabamento	1
	80	Faceamento em barra		81	Facejamento	Desbaste	1
				82	Facejamento	Acabamento	1

2ºFolha:Relação de geometrias base com ferramentas

Geometria de base	ID	Ferramenta	ID
Superfície plana	10	Fresa	F11
		Fresa de pastilhas	F12
Cantos a 90 graus	20	Fresa de topo e lateral	F21
		Fresa de topo e lateral de pastilhas	F22
Cantos	30	Fresa de topo e lateral	F31
		Fresa de topo e lateral de pastilhas	F32
Caixa interna	40	Fresa de topo e lateral	F41
		Fresa de topo e lateral de pastilhas	F42
Rasgo	50	Fresa de topo e lateral	F51
		Fresa de topo e lateral de pastilhas	F52
Furo cilíndrico	60	Broca	F61
		Barra de furar com pastilhas	F62
	70	Broca	F71
		Barra de furar com pastilhas	F72
Superfícies cilíndrica	80	Pastilha	F81
	90	Pastilha	F91

3ºFolha:Cracterísticas das máquinas disponíveis

Máquina	ID	Qualidade Máxima	Qualidade Mínima	t _{sm}	t _{st}	C _m
Centro de maquinagem	M001	IT12	IT8	0,7	0,05	30
Torno CNC	M002	IT12	IT8	0,5	0,15	30

Nível de rugosidade	Ra
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

4ªFolha:Cálculo dos volumes a remover para obter a geometria base

Geometria base	ID	Dimensões de comprimento	Valor (mm)	Volume (mm3)
Superfície plana	10	Comprimento		
		Largura		
		Altura		
Cantos a 90 graus	20	Comprimento		
		Largura		
		Altura		
Cantos	30	Comprimento		
		Largura		
		Altura		
Caixa interna	40	Diâmetro furação em Hélix		
		Altura		
		Largura		
		Comprimento		
Rasgo	50	Comprimento		
		Largura		
		Altura		
Furo cilíndrico	60	Diâmetro		
		Altura		
Superfícies cilíndrica	70	Diâmetro inicial		
		Diâmetro final		
		Comprimento		
	80	Diâmetro		
		Comprimento		

5ªFolha:Descrição das características das ferramentas de corte que se pretende utilizar

COD	DESCRIÇÃO	CÓDIGO	DIÂMETRO	AP MÁX	ZC	CHANFRO DE CANTO	ÂNGULO MÁX RAMPA	RAIO DE CANTO	VALOR UNITÁRIO
T001									
T002									
T003									
T004									
T005									
T006									
T007									
T008									
T009									
T010									
T011									
T012									
T013									
T014									
T015									
T016									
T017									
T018									
T019									
T020									
T021									
T022									
T023									
T024									
T025									

[illegible]

58

[illegible]

8ªFolha: Custo para Torno

CUSTOS DE PRODUÇÃO TORNO		VOLTAR PARA CENTRO
		VOLTAR PARA TORNO
Parâmetro	Valor	
Cm	30	
Cl	30	
tlt	32	
tst	0,15	
tsm	0,5	
Nf	1	
ttf	12	
N	1	
tr	3	
Cma	2,61	
Vp	1282	
ρ	7,84	
Percentagem de DGf	0	
Co	2,34	
ti	0	
Percentagem de lucro	2	
CM	73	

9ªFolha: Custo para centro de maquinagem

CUSTOS DE PRODUÇÃO CENTRO		VOLTAR PARA CENTRO
		VOLTAR PARA TORNO
Parâmetro	Valor	
Cm	30	
Cl	30	
tlt	19	
tst	0,05	
tsm	0,7	
Nf	6	
ttf	12	
N	1	
tr	0	
Cma	2,99	
Vp	396	
ρ	7,84	
Percentagem de DGf	0	
Co	8,64	
ti	3	
Percentagem de lucro	2	
CM	84	

Folhas de cálculo para obter a folha de orçamento:

1ºFolha:Descrição do cliente

COD	Descrição	Documento	Morada	Nome do contacto	Telefone	E-Mail	VOLTAR PARA O ORÇAMENTO		
CLI001	José	0000.000.00		José	910225534	joseaferreira@ua.pt			
CLI002									
CLI003									
CLI004									
CLI005									
CLI006									
CLI007									
CLI008									
CLI009									
CLI010									
CLI011									
CLI012									
CLI013									
CLI014									
CLI015									
CLI016									
CLI017									
CLI018									
CLI019									

2ºFolha:Descrição do produto

COD	DESCRIÇÃO	UNIDADE	VALOR UNITÁRIO	VOLTAR PARA O ORÇAMENTO	
PRD001	P1	KG			
PRD002					
PRD003					
PRD004					
PRD005					
PRD006					
PRD007					
PRD008					
PRD009					
PRD010					
PRD011					
PRD012					
PRD013					
PRD014					
PRD015					
PRD016					
PRD017					
PRD018					



universidade de aveiro

DADOS PERSONALIZADOS PARA PREENCHIMENTO DO FORMULÁRIO

>> CÓDIGO DO CLIENTE CLI001 [CLIQUE PARA INTRODUIZIR TODOS OS CLIENTES](#)
 >> LOCALIDADE
 >> DATA DA EMISSÃO 11-12-17
 >> LINHA #1 [nome do vendedor]
 >> LINHA #2 [digite aqui todas as formas de contato: telefones, email]

DADOS DO CLIENTE

JOSÉ - 910225534 - JOSEAFERREIRA@UA.PT
 JOSÉ (0000.000.00)

ORÇAMENTO N°.

20171211153134

DETALHE DO PEDIDO

COD	DESCRIÇÃO DO PRODUTO	QTD	UND	VL. UNIT.	VL. TOTAL
PRD001	P1	1	KG	78,44 €	78,44 €
PRD002	P2	1	KG	90,69 €	90,69 €
PRD003	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD004	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD005	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD006	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD007	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD008	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD009	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD010	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD011	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD012	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD013	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD014	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD015	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD016	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD017	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD018	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD019	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD020	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD021	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD022	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD023	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD024	0		0	0,00 €	0,00 €
PRD025	0		0	0,00 €	0,00 €

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

[INTRODUZIR MAIS](#)

VALOR TOTAL DO PEDIDO

169,12 €

DESCONTO

5,0%

8,46 €

TOTAL PARCIAL (SEM FRETE)

160,66 €

CUSTOS COM TRANSPORTE (FRETE)

0,00 €

ORÇAMENTO FINAL

160,66 €

Anexo B

Características técnicas das máquinas- ferramenta

Torno CNC:

Contraponto	
Diâmetro	72 mm
Acionamento	Hidráulico
Bucha	
Distância máx. efect. Entre bucha e contraponto	500 mm
Diâmetro máximo da bucha	200 mm
Acionamento	Hidráulico
Posicionamento rápido dos eixos	
Eixo X	10 m/min
Eixo Y	10 m/min
Torreta	
Ferramenta de corte (internas e externas)	12
Tempo de indexação	1,2 s
Outras características	
Velocidade máxima de rotação	4500 rpm
Potência máxima	25 cv
Controlador	Fanuc séries O-T
Peso (aproximado)	4 ton.
Distância Longitudinal (eixo Z)	550 mm
Distância Longitudinal (eixo X)	200 mm

Centro de maquinagem:

Eixos	
X	508 mm
Y	406 mm
Z	508 mm
Mesa	
Comprimento	660 mm
Largura	356 mm
Largura ranhura-T	16 mm
Distância ao centro ranhura-T	125 mm
Número de ranhuras-T	3
Peso máximo	1361 kg
Árvore	
Potência máxima	22,4 kW
Velocidade máxima	8100 rpm
Força máxima	122 Nm@ 2000 rpm
Drive System	Inline Direct-Drive
Lubrificação dos rolamentos	Ar/óleo
Refrigeração	Líquido arrefecido
Avanços	
Rápido X	25,4 m/min
Rápido Y	25,4 m/min

Rápido Z	25,4 m/min
Corte máximo	16,5 m/min
Torreta	
Tipo	Carousel (SMTC Optional)
Capacidade	20
D. Ferramenta máx.	89 mm
Peso Ferramenta máx.	5,4 kg
Tempo de indexação	4,2 s
Outras Características	
Requisitos do ar	113 L/min, 6,9 bar
Capacidade de refrigeração	208 L

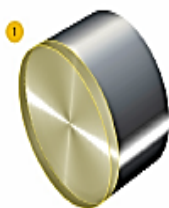
Dados de corte para as operações sugeridos pela SANDVIK Coromant (Sugestões a partir do site da empresa):

Facejamento

Resumo dos dados de corte para Faceamento da barra



Dados de corte



Legenda

1 Pré-usinagem

1

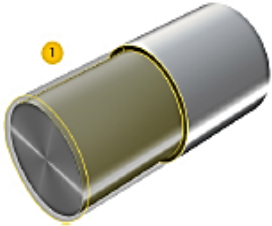


Velocidade de corte (VC)	284 m/min
Avanço por rotação (FN)	0,707 mm
Número de passes na direção AP (NOPAP)	1
Profundidade de corte (AP)	1,5 mm
Rotação máxima (RPM MAX)	3000 1/min
Potência de corte máxima (PC MAX)	9,48 kW
Torque máximo de corte (MC MAX)	85,1 Nm

Torneamento

Resumo dos dados de corte para Superfície cilíndrica com cantos a 90 graus



Dados de corte

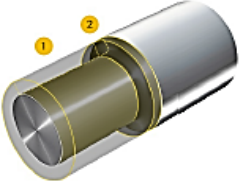




		Legenda  Pré-usinagem	
			
Velocidade de corte (VC)	333	m/min	
Avanço por rotação (FN)	0,35	mm	
Número de passes na direção AP (NOPAP)	1		
Diâmetro inicial usinado (DMS)	85	mm	
Diâmetro final usinado (DME)	82	mm	
Profundidade de corte (AP)	1,5	mm	
Rotação máxima (RPM MAX)	1290	1/min	
Potência de corte máxima (PC MAX)	6,12	kW	
Torque máximo de corte (MC MAX)	45,2	Nm	

Torneamento de perfil

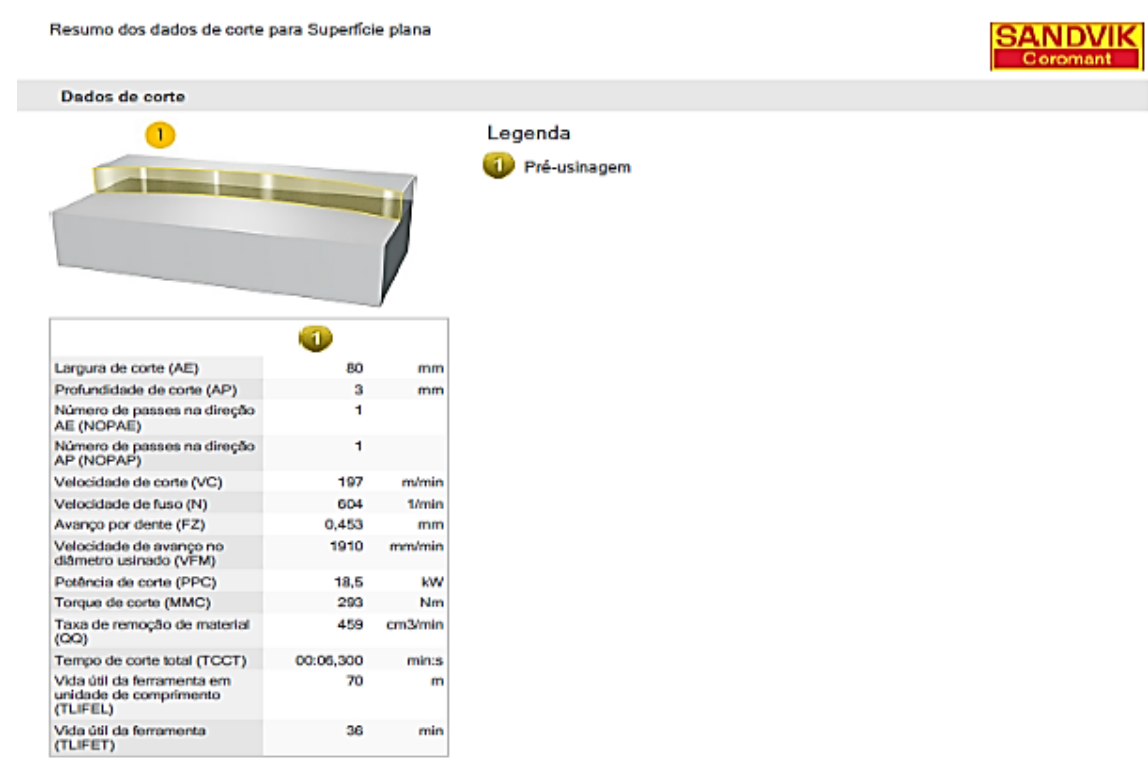
Resumo dos dados de corte para Superfície cilíndrica com cantos a 90 graus



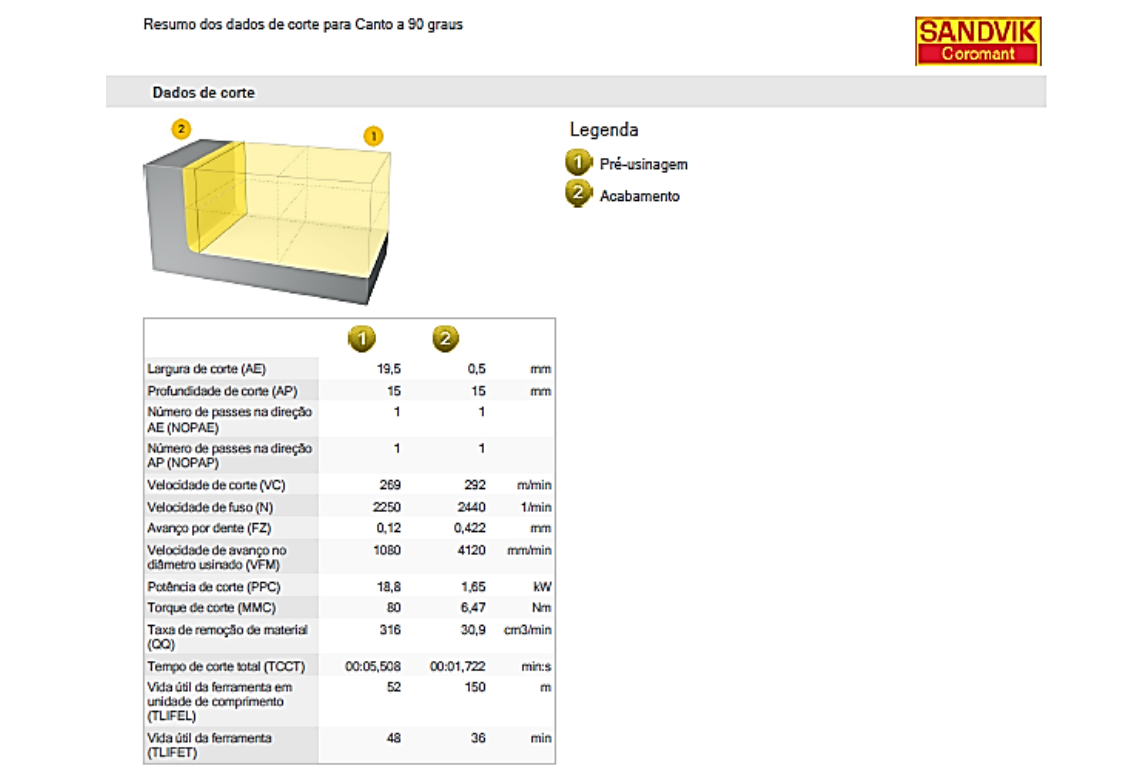
Dados de corte

		Legenda  Pré-usinagem longitudinal  Pré-usinagem frontal	
			
Velocidade de corte (VC)	283	333	m/min
Avanço por rotação (FN)	0,35	0,35	mm
Número de passes na direção AP (NOPAP)	2	1	
Diâmetro inicial usinado (DMS)	82	82	mm
Diâmetro final usinado (DME)	52	52	mm
Profundidade de corte (AP)	7,5	5	mm
Rotação máxima (RPM MAX)	1730	2040	1/min
Potência de corte máxima (PC MAX)	24,3	19,2	kW
Torque máximo de corte (MC MAX)	173	142	Nm

Fresagem Plana



Fresagem lateral

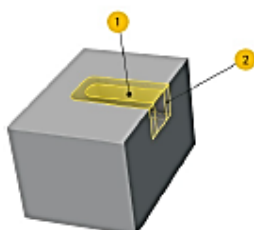


Fresagem da caixa interna

Resumo dos dados de corte para Bolsão retangular em material sólido



Dados de corte



Legenda

- Fresamento helicoidal
- 1** Pré-usinagem
- 2** Acabamento

		1	2	
Largura de corte (AE)	15	15	0,3	mm
Profundidade de corte (AP)	2,5	10	10	mm
Número de passes na direção AE (NOPAE)	1	1	1	
Número de passes na direção AP (NOPAP)	4	1	1	
Diâmetro inicial usinado (DMS)	30			mm
Ângulo efetivo da rampa (RMP)	3,04			°
Velocidade de corte (VC)	184	172	377	m/min
Velocidade de fuso (N)	3900	3650	8000	1/min
Avanço por dente (FZ)	0,0901	0,0901	0,211	mm
Velocidade de avanço no diâmetro usinado (VFM)	1060	987	5060	mm/min
Velocidade de avanço (VF)	528			mm/min
Potência de corte (PPC)	2,44	9,11	1,16	kW
Torque de corte (MMC)	5,96	23,8	1,39	Nm
Taxa de remoção de material (QQ)	19,8	148	15,2	cm³/min
Tempo de corte total (TCCT)	00:21,420	00:08,340	00:01,626	min:s
Tempo total fora de corte (TNCT)	00:00,000	00:00,000	00:00,189	min:s
Vida útil da ferramenta em unidade de comprimento (TLIFEL)	18	18	460	m
Vida útil da ferramenta (TLIFET)	17	18	90	min

Furação

Dados de corte

Velocidade de corte (VC)	180 m/min
Velocidade de fuso (N)	5730 1/min
Avanço por rotação (FN)	0,24 mm
Velocidade de avanço (VF)	1380 mm/min
Número de furos (TLIFEC)	2520 Furos
Vida útil da ferramenta (TLIFET)	55 min
Vida útil da ferramenta em unidade de comprimento (TLIFEL)	76 m
Potência de corte (PPC)	5,62 kW
Torque de corte (MMC)	9,36 Nm
Força de avanço (FFF)	1500 N



Dados de corte

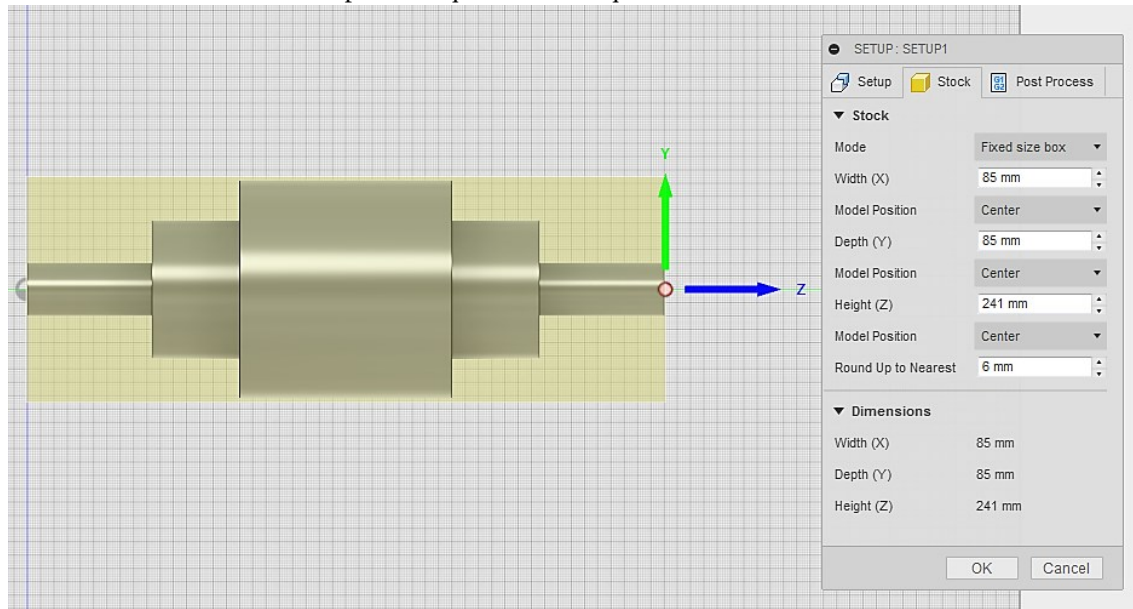
Velocidade de corte (VC)	128 m/min
Velocidade de fuso (N)	7990 1/min
Avanço por rotação (FN)	0,18 mm
Velocidade de avanço (VF)	1440 mm/min
Número de furos (TLIFEC)	12500 Furos
Vida útil da ferramenta (TLIFET)	87 min
Vida útil da ferramenta em unidade de comprimento (TLIFEL)	120 m
Potência de corte (PPC)	1,74 kW
Torque de corte (MMC)	2,08 Nm
Força de avanço (FFF)	651 N



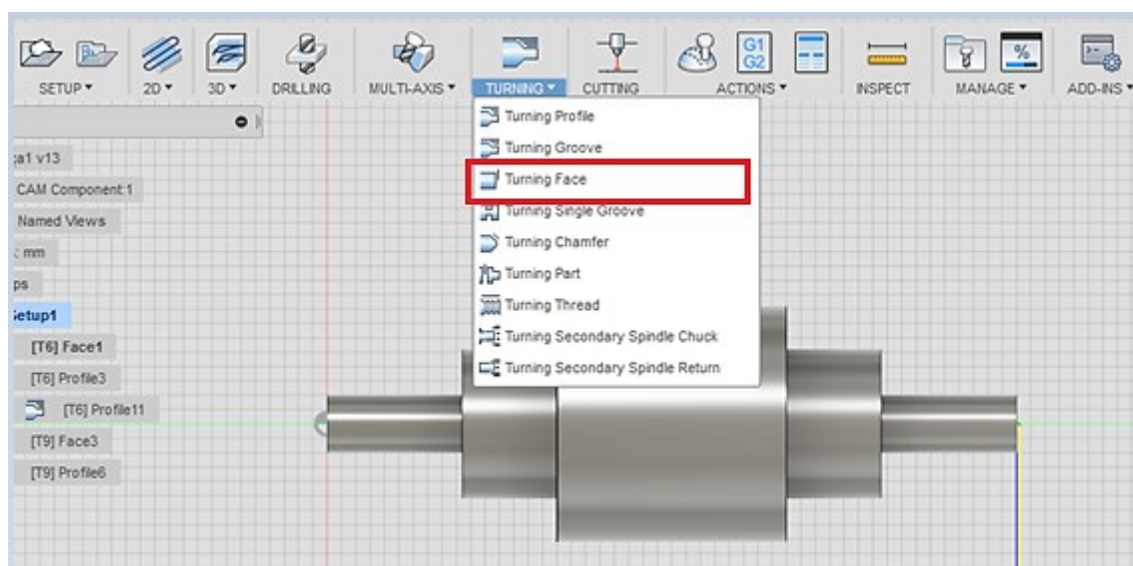
Anexo C

Maquinagem de peça P1 no software Autodesk Fusion 360

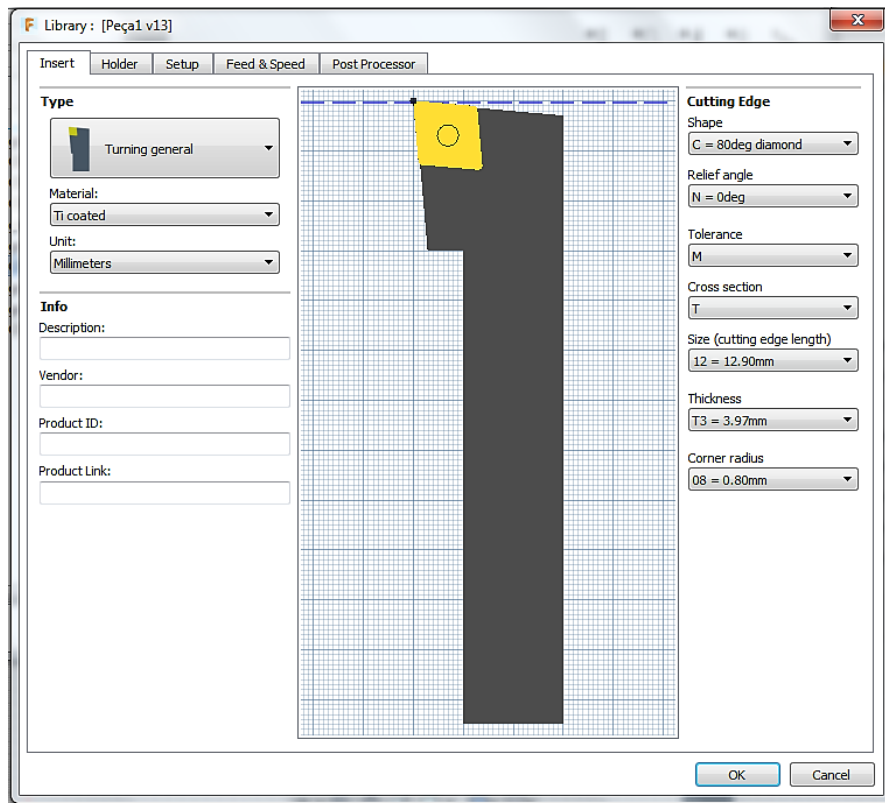
Inicialmente define-se o semi-produto que se vai maquinar:



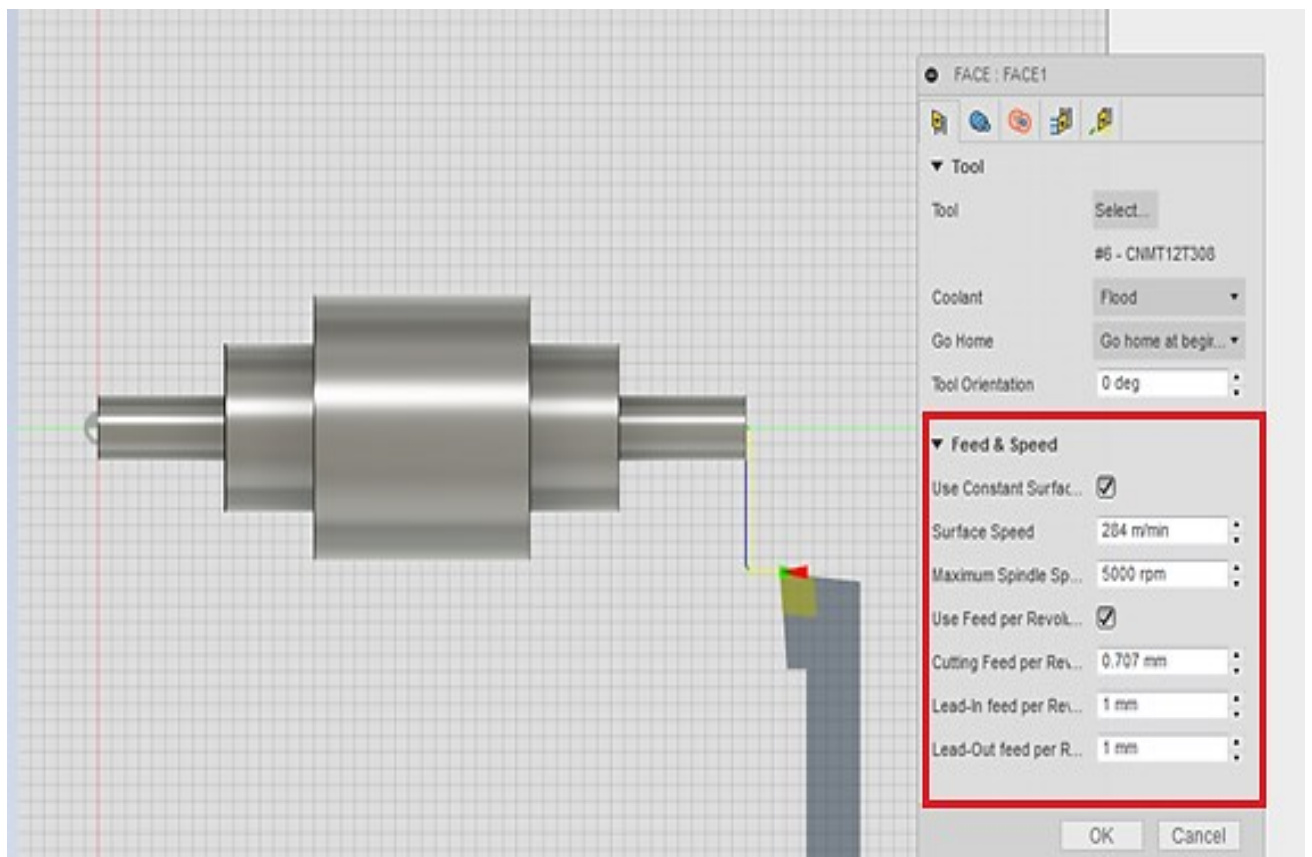
De seguida selecciona-se a operação a utilizar. A primeira operação é uma operação de faceamento:



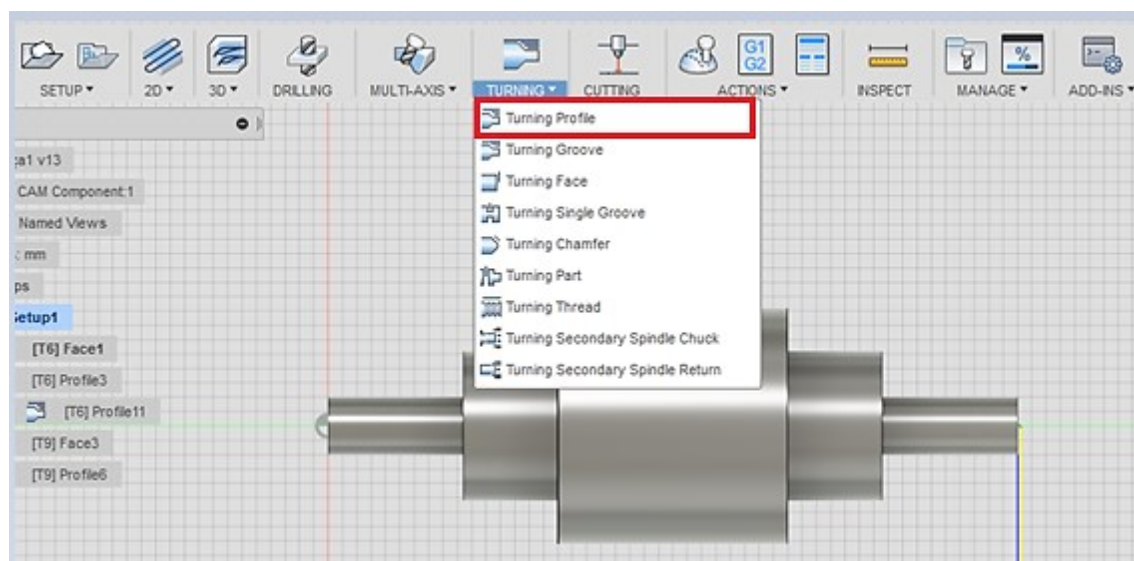
Com a operação seleccionada é necessário definir a ferramenta de corte que nesta peça é sempre a mesma:



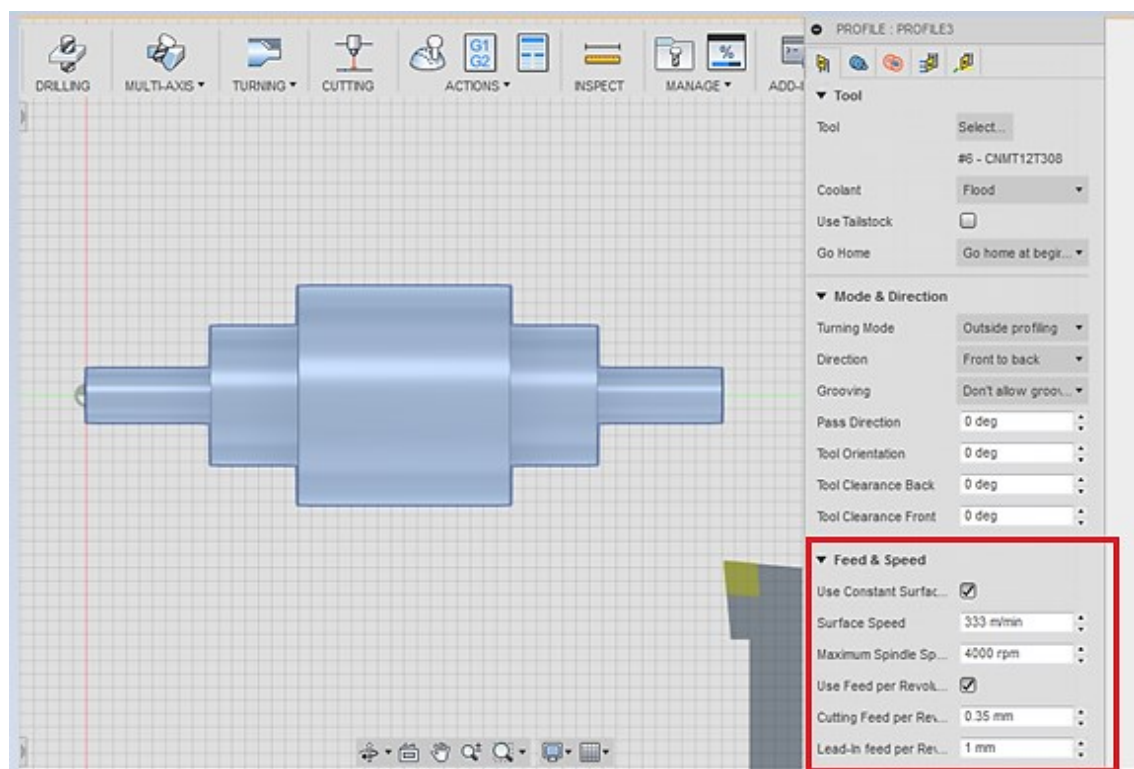
O passo seguinte é definir a velocidade de corte, o avanço da operação e profundidade de corte:

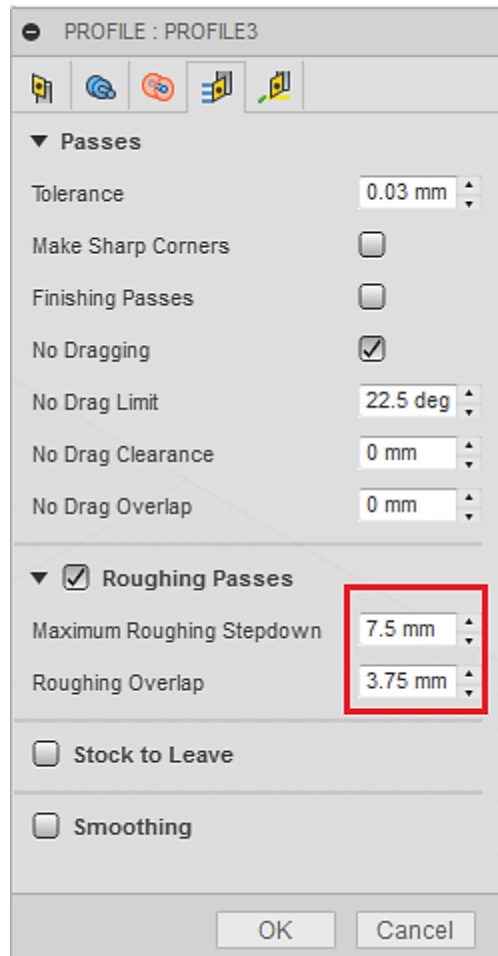


A operação seguinte é a de torneamento de perfil



Os parâmetros de corte são definidos seguidamente:

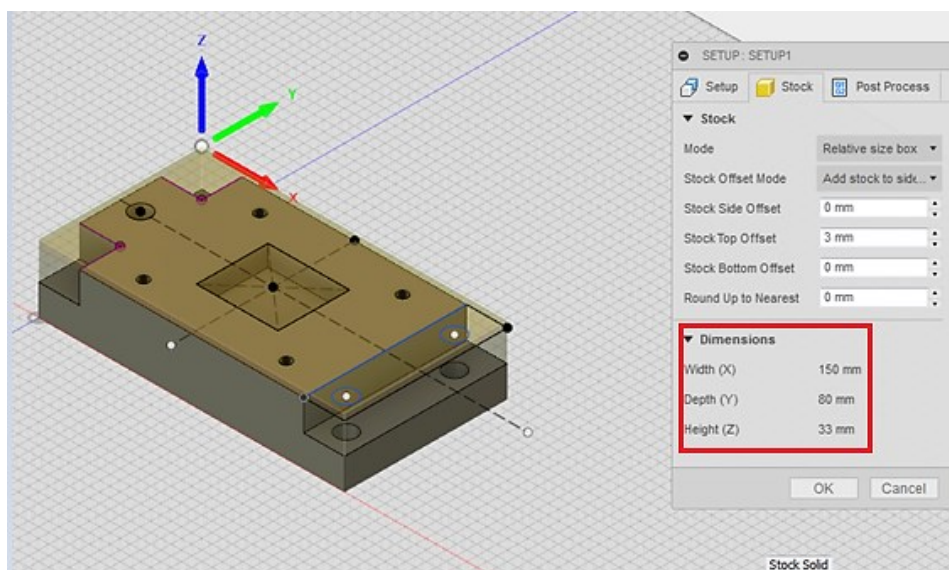




Depois de a peça ser rodada as restantes operações são definidas da mesma forma.

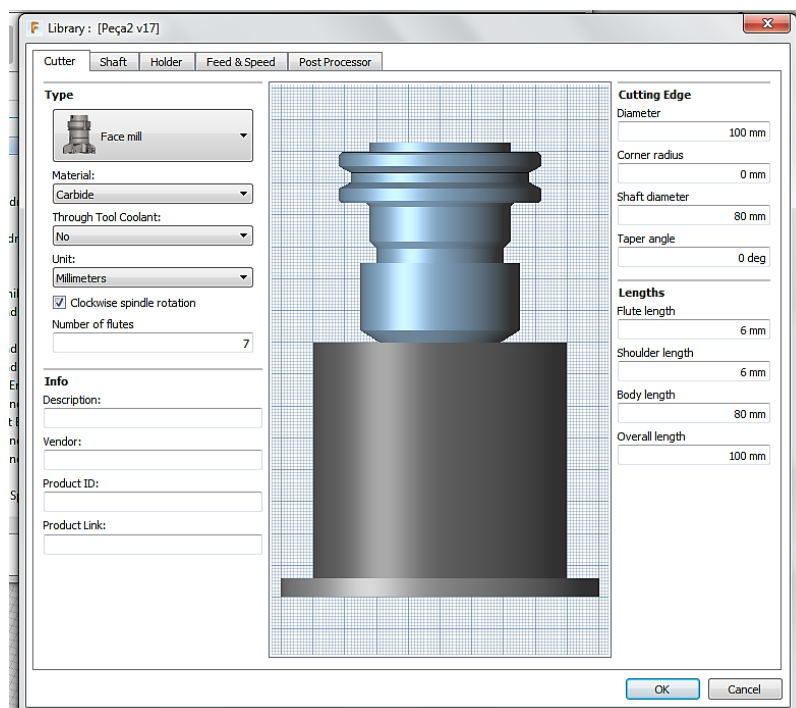
Maquinagem de peça P2 no software Autodesk Fusion 360

Começa-se por definir as dimensões do semi-produto:

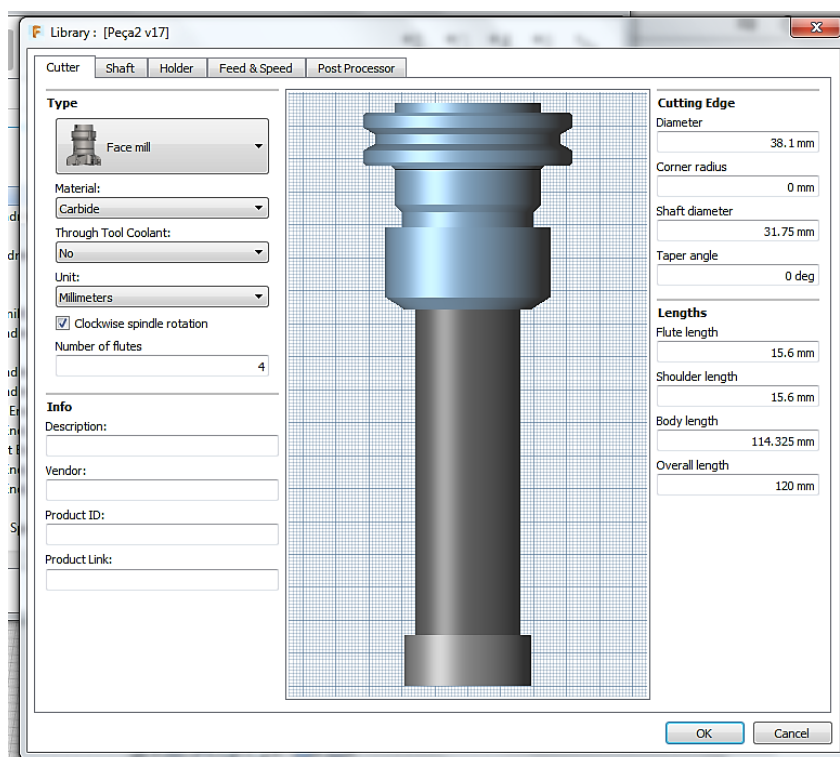


De seguida define-se as ferramentas de corte utilizadas na maquinação desta peça:

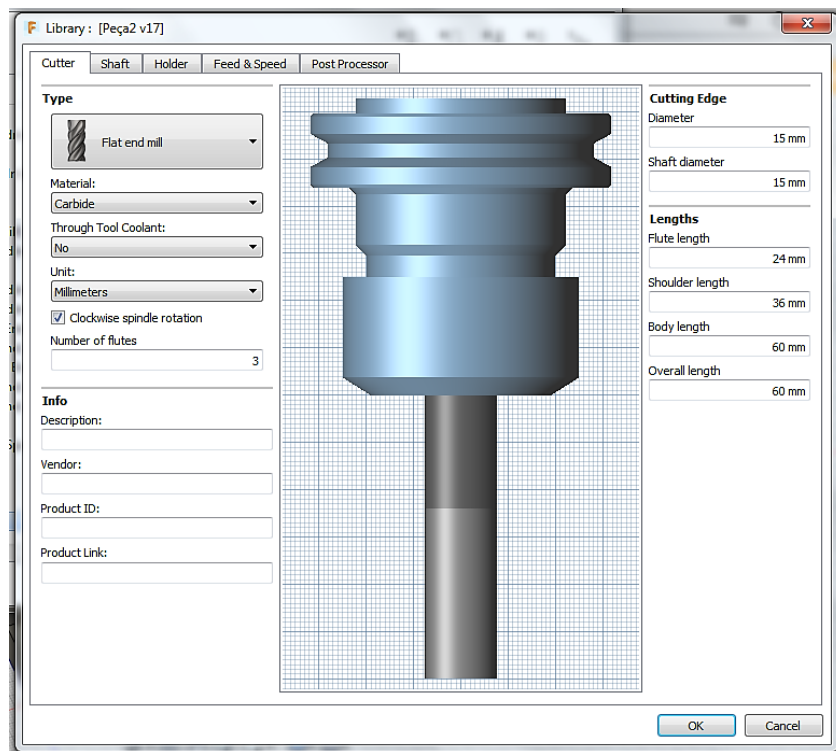
T01



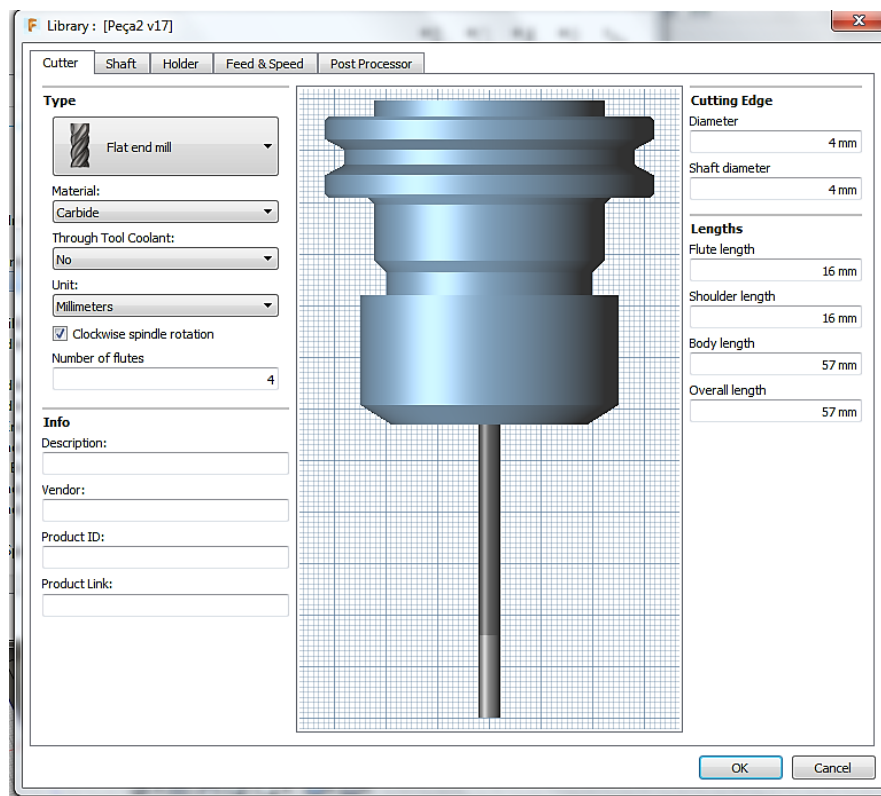
T02



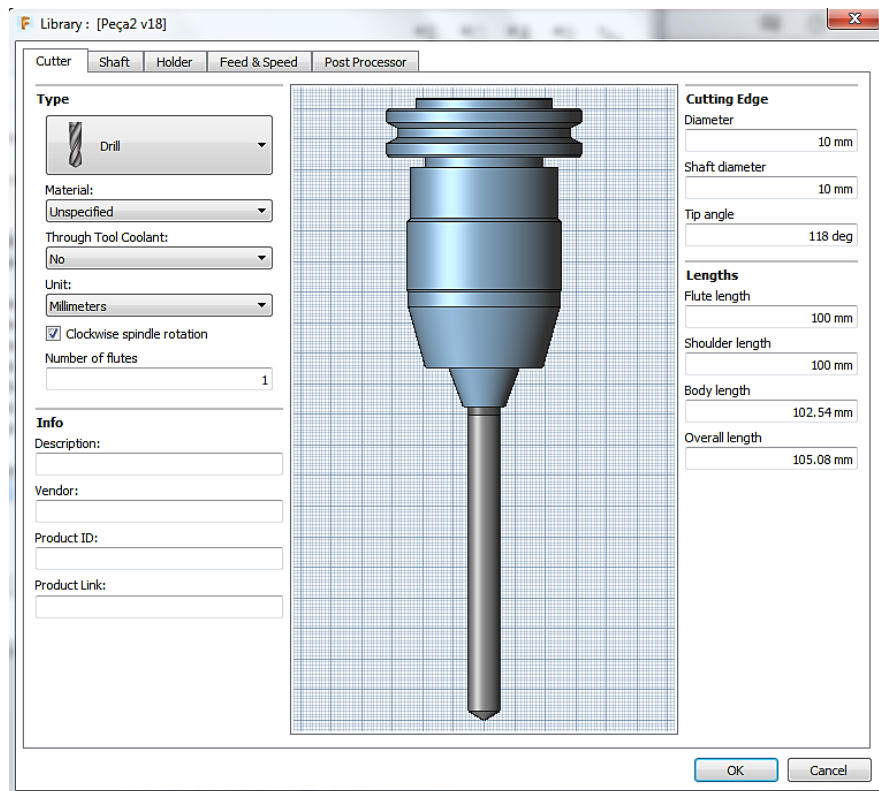
T03



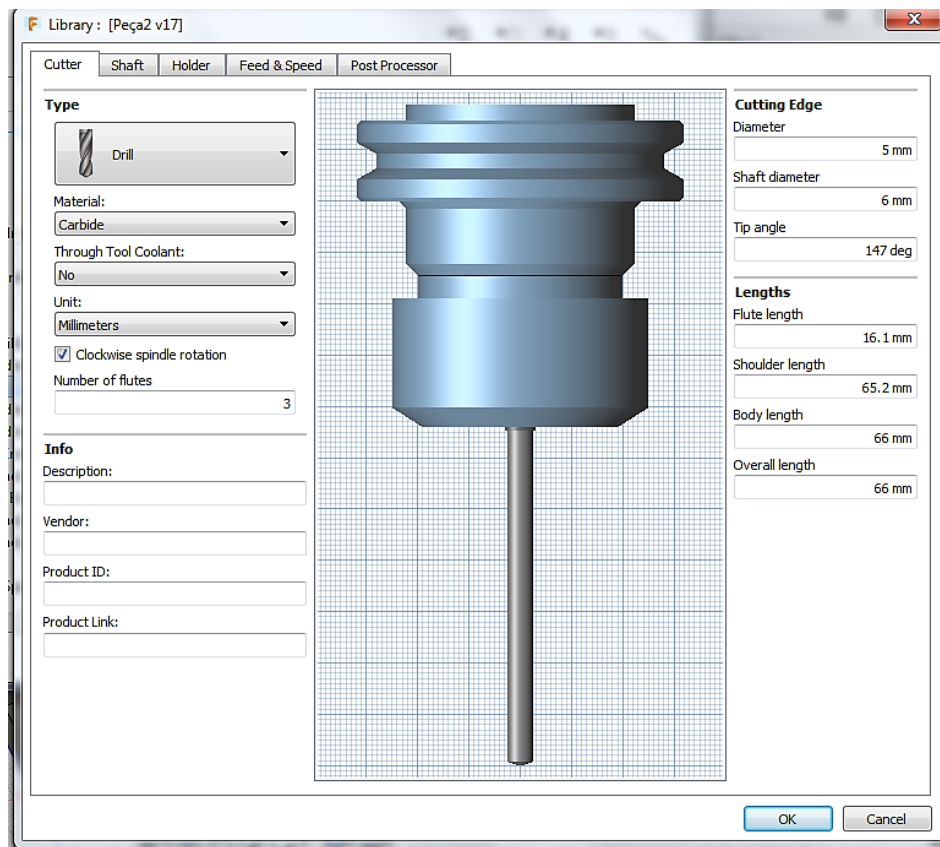
T04



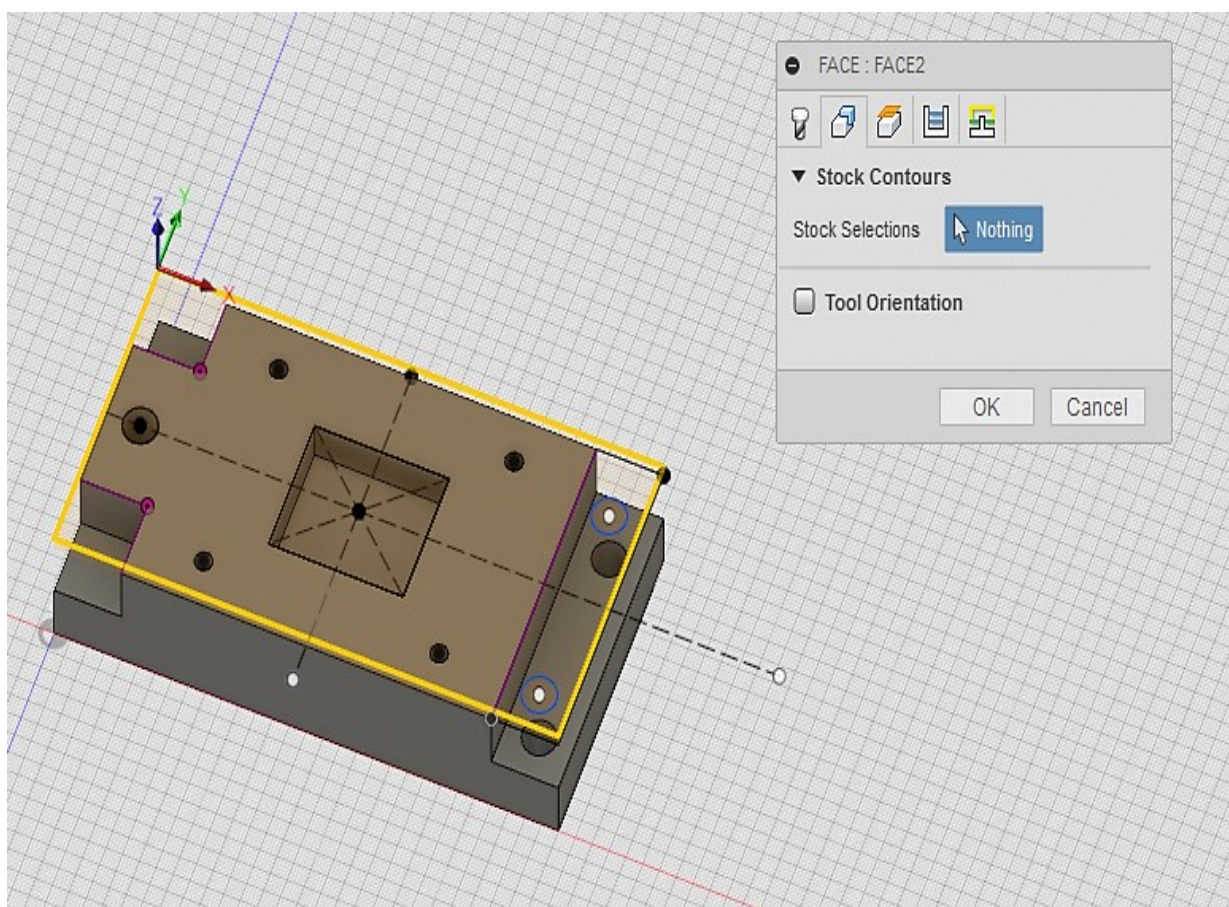
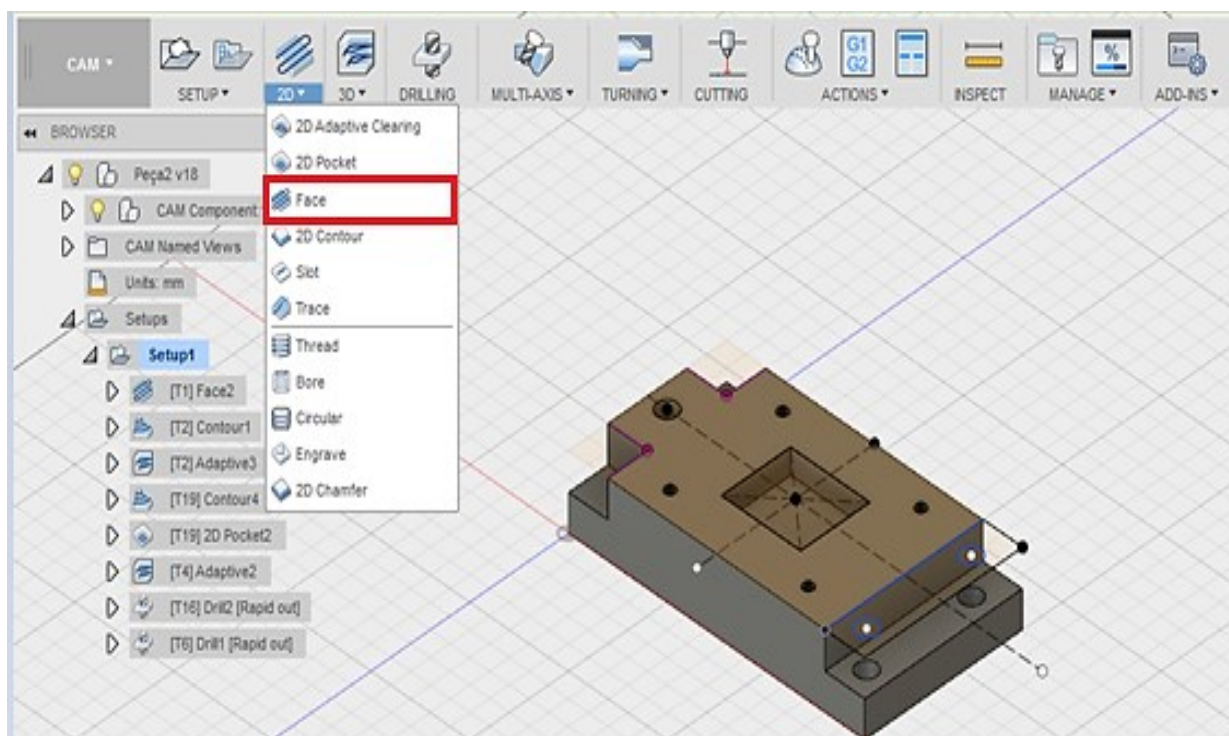
T05



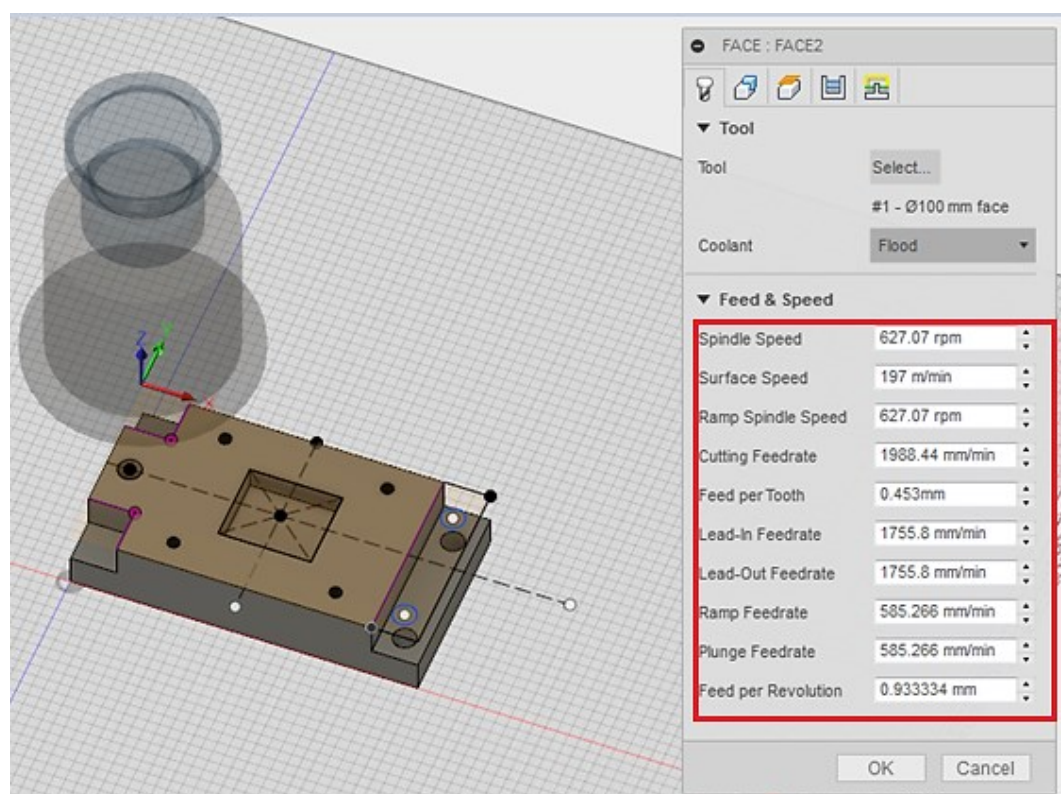
T06



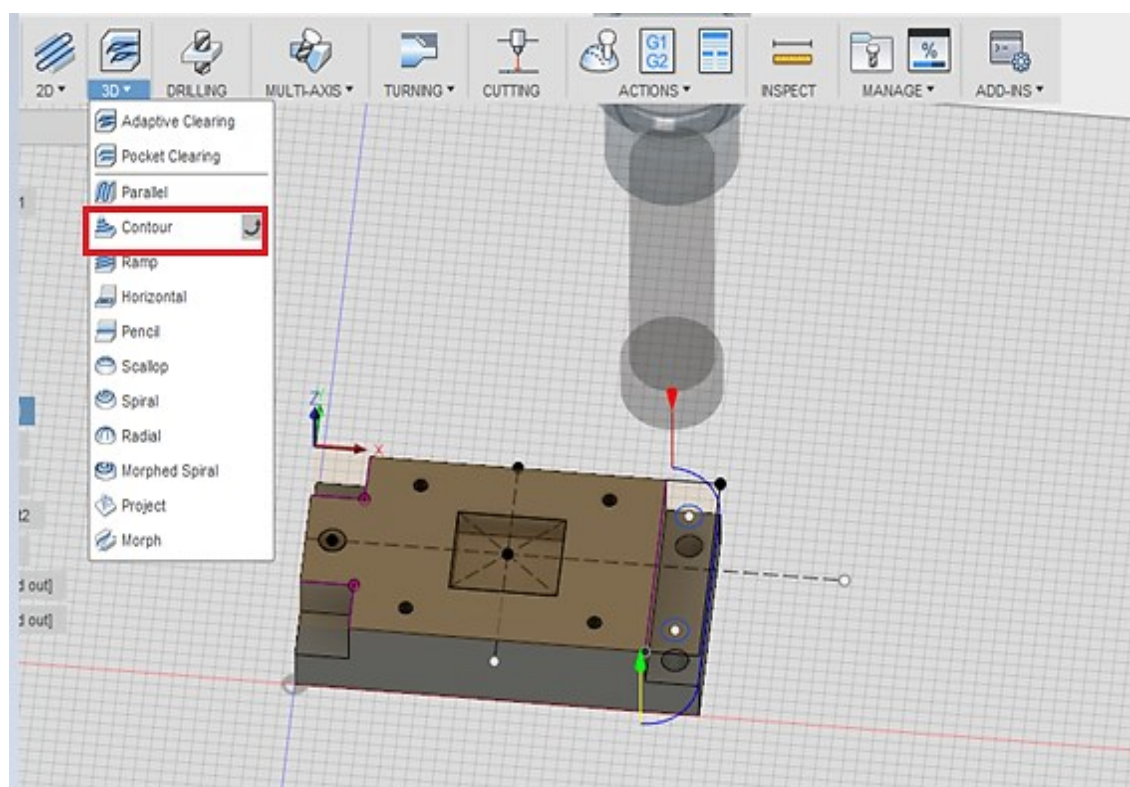
A primeira operação é de faceamento:



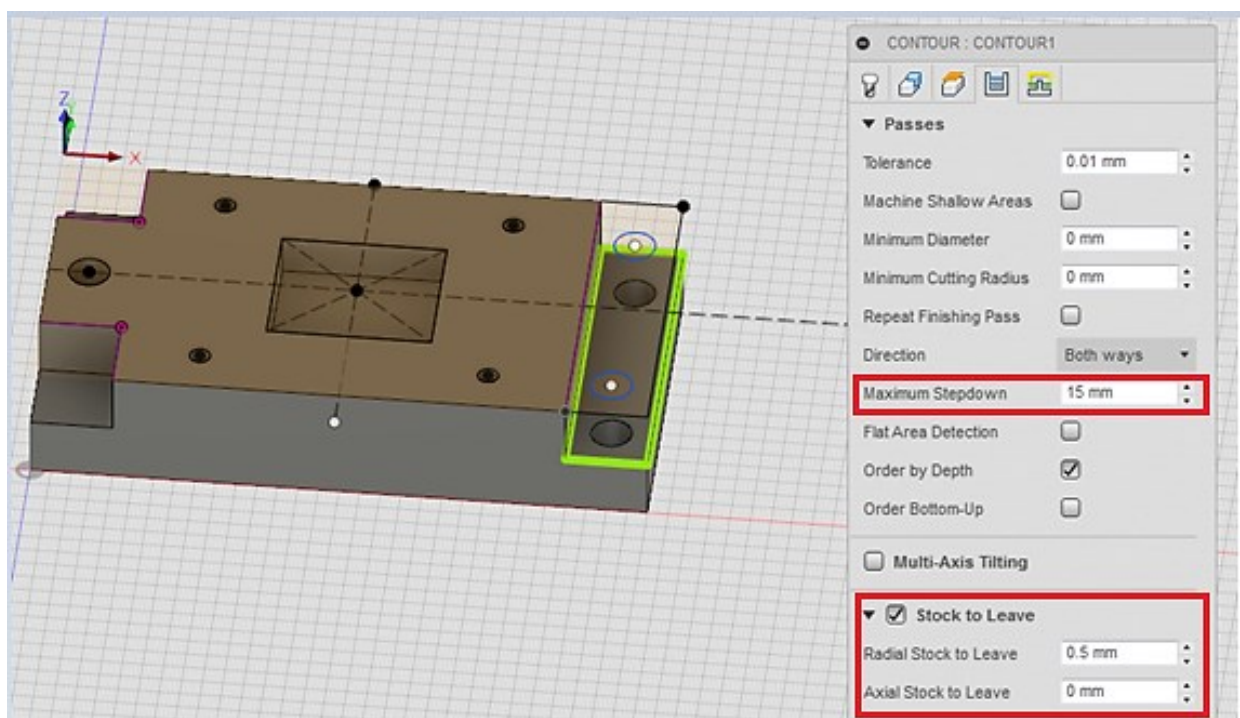
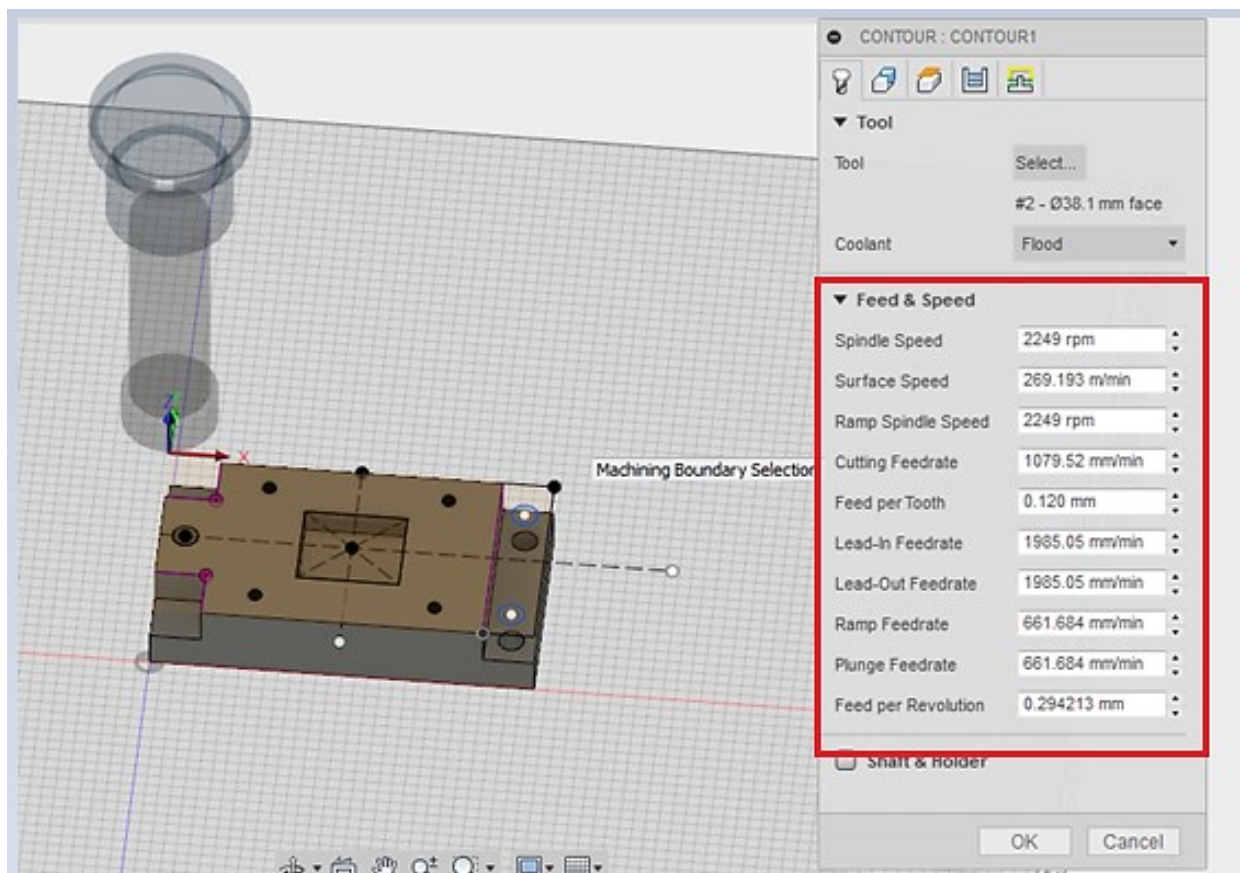
O passo seguinte é seleccionar os parâmetros de corte:



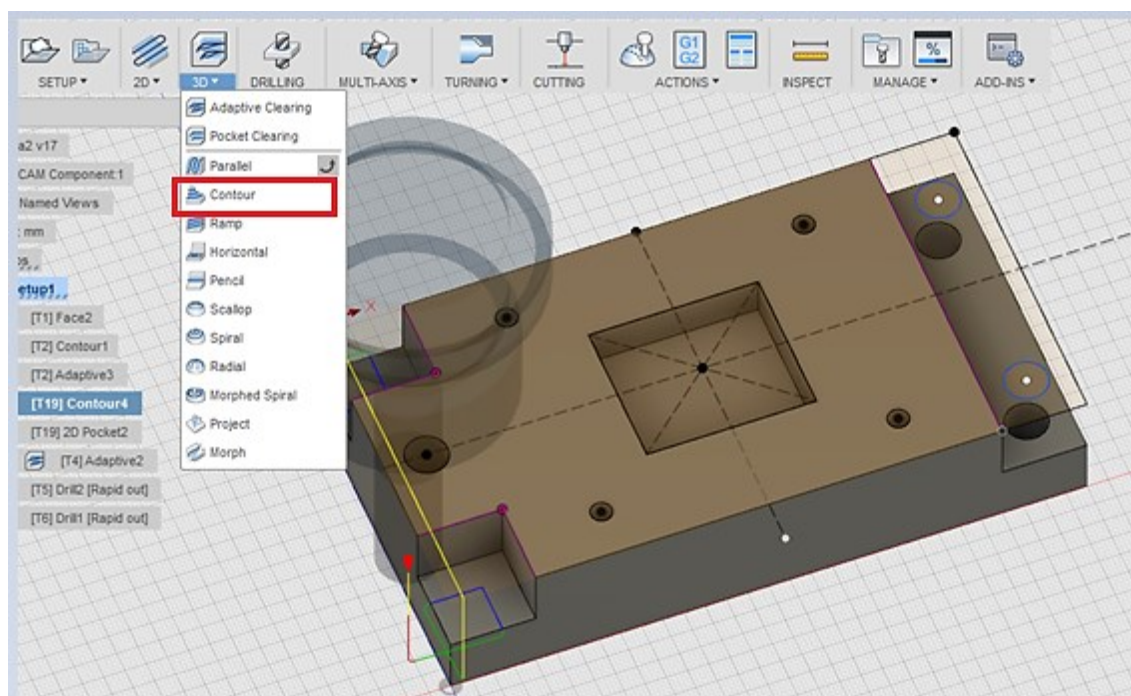
O que se segue é um contorno:



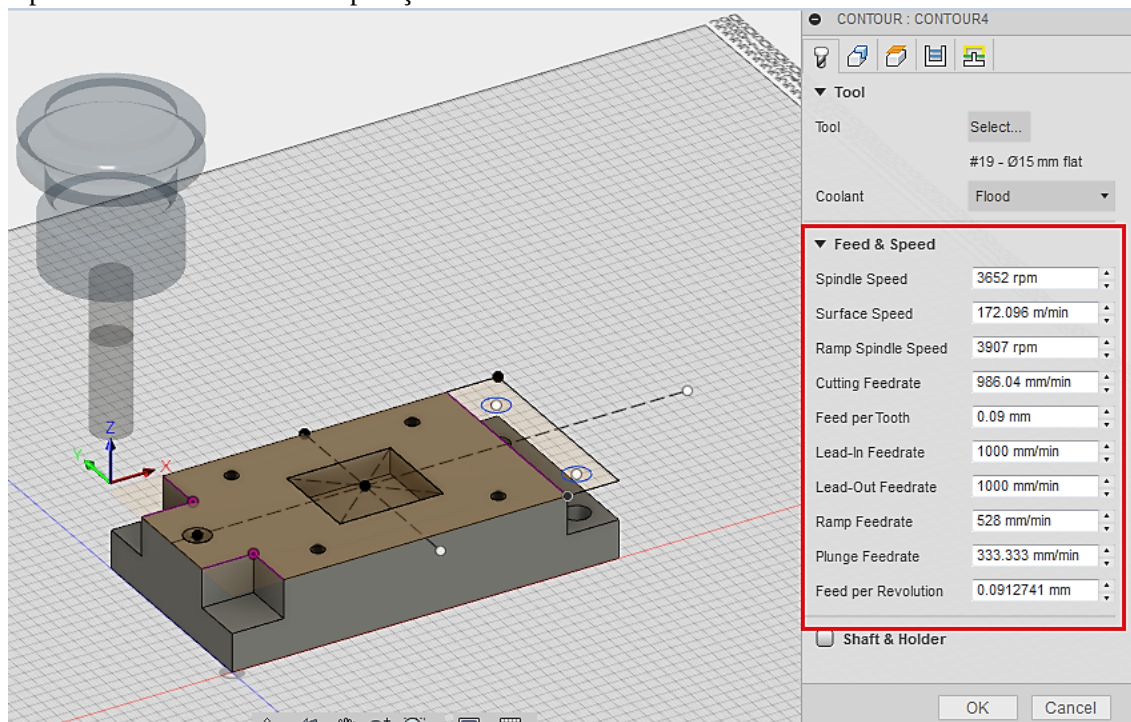
Os parâmetros de corte para esta operação são os seguintes:

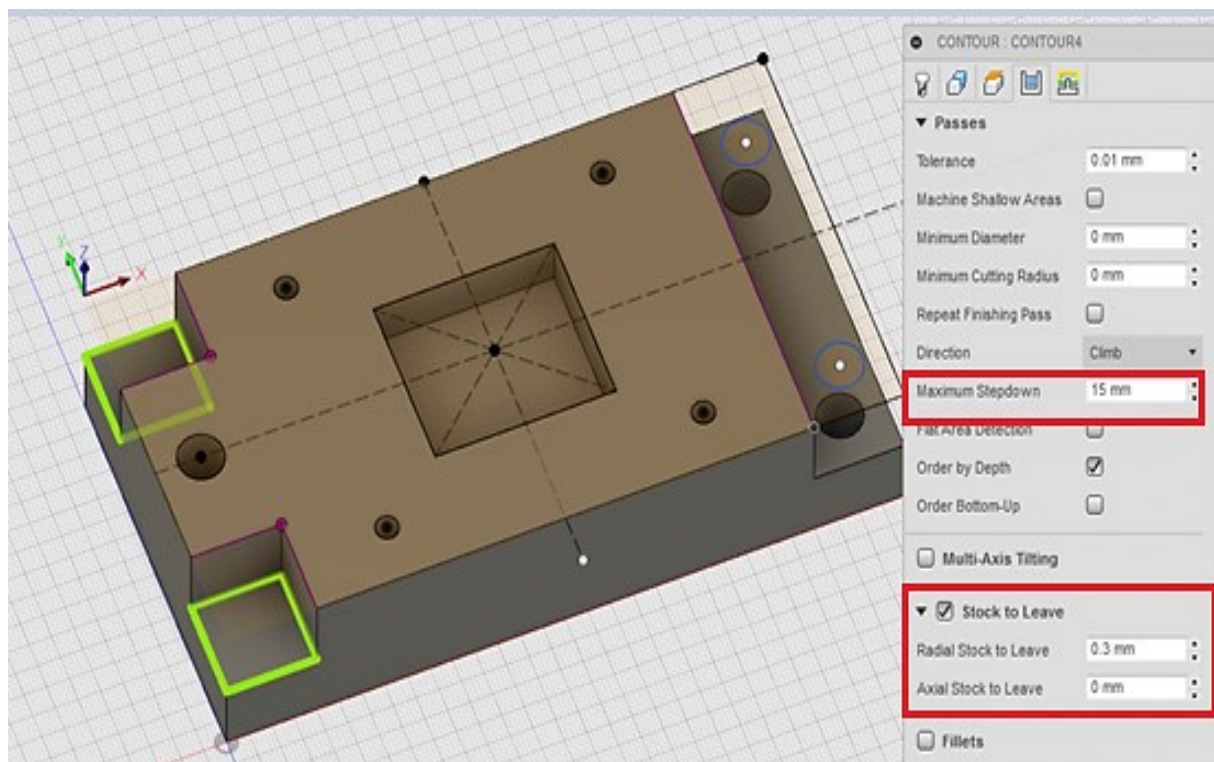


Passa-se agora para a criação dos cantos:

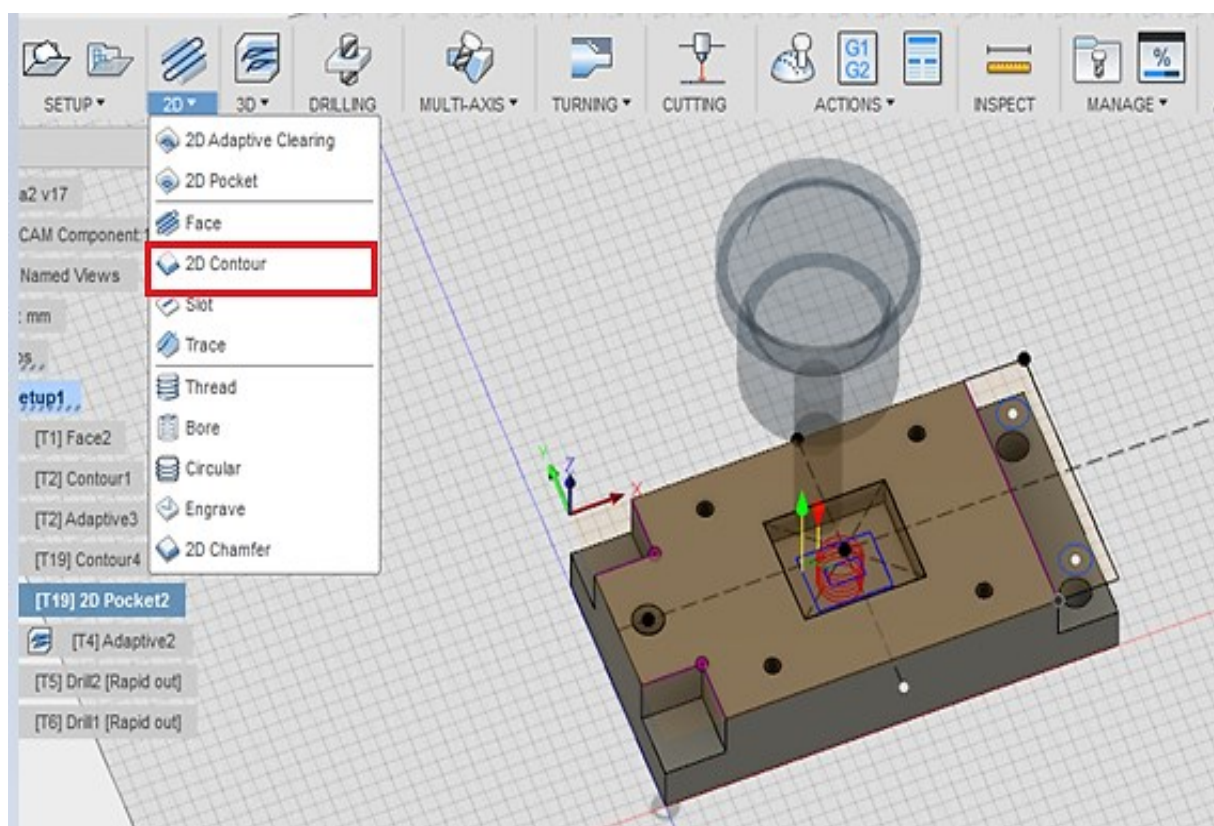


Os parâmetros de corte desta operação são:

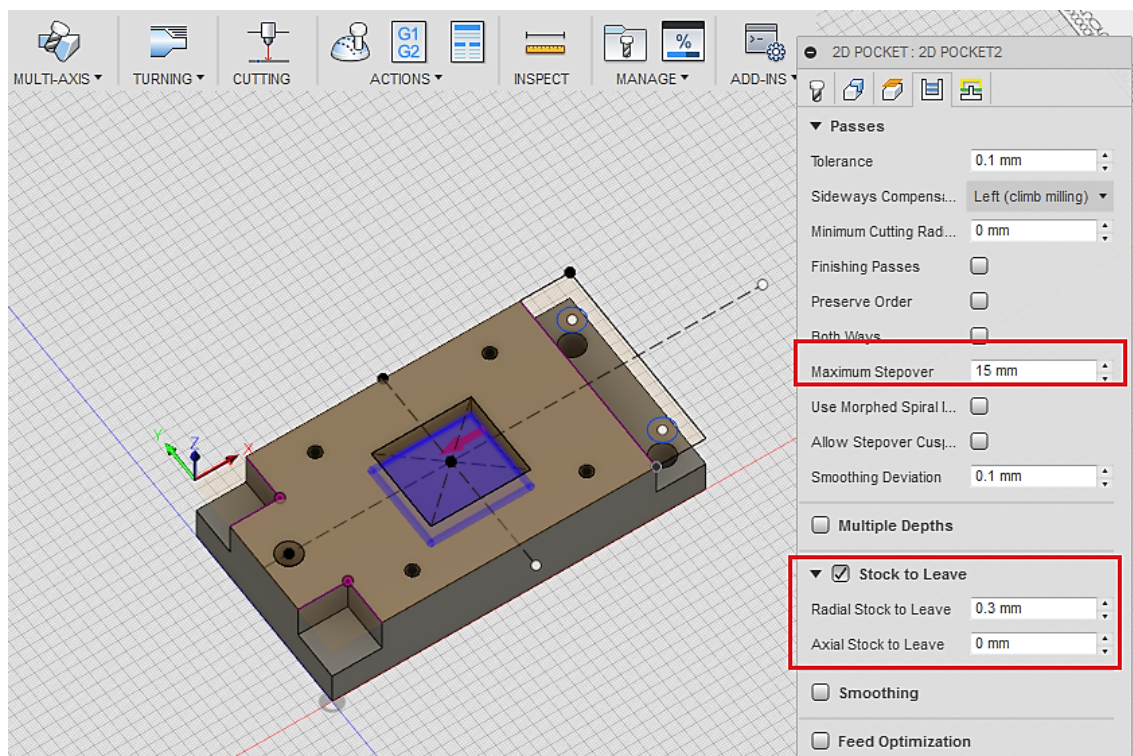
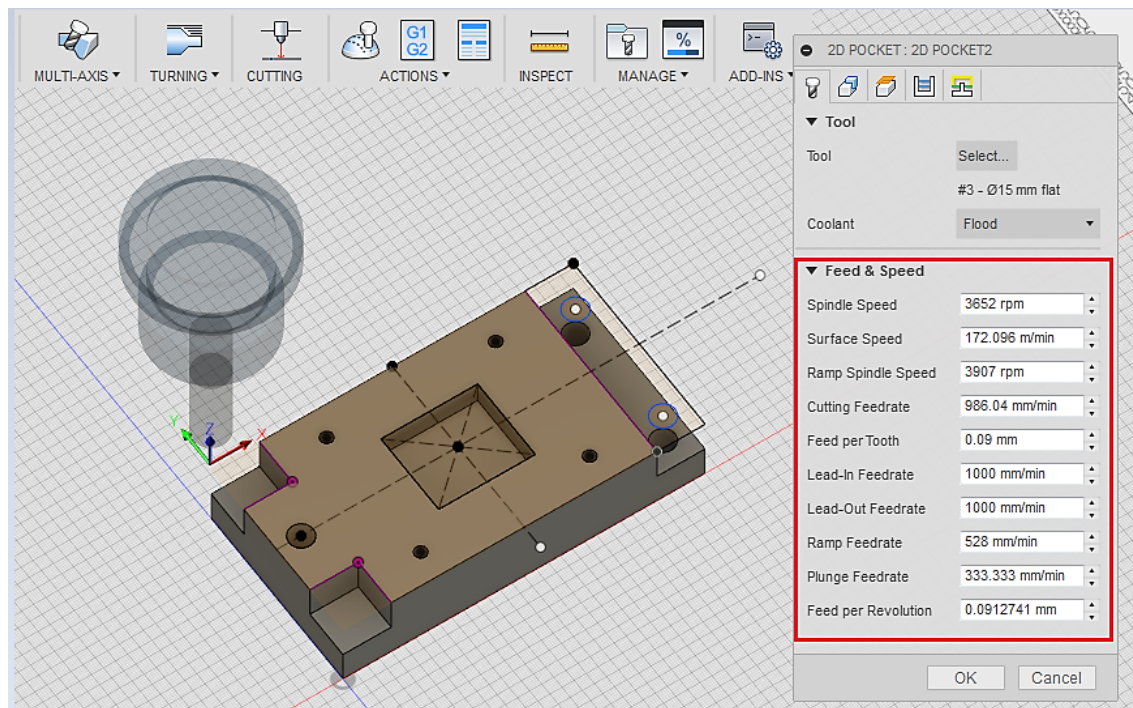




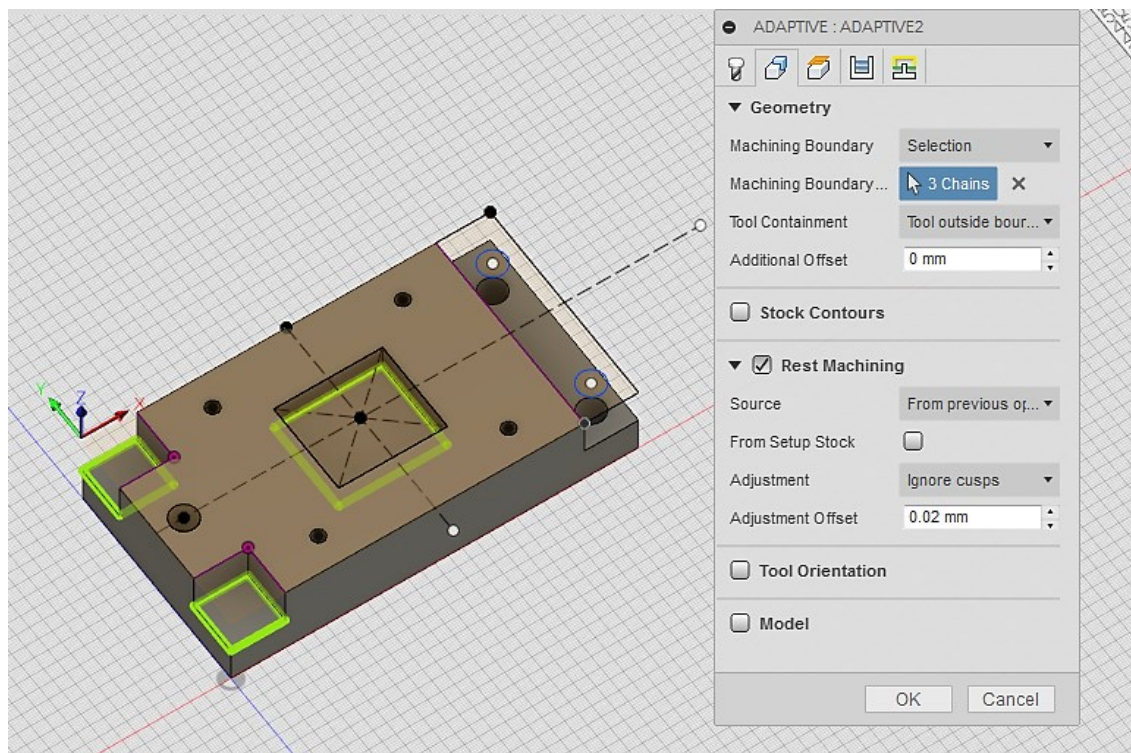
De seguida é realizada a abertura da caixa interna:



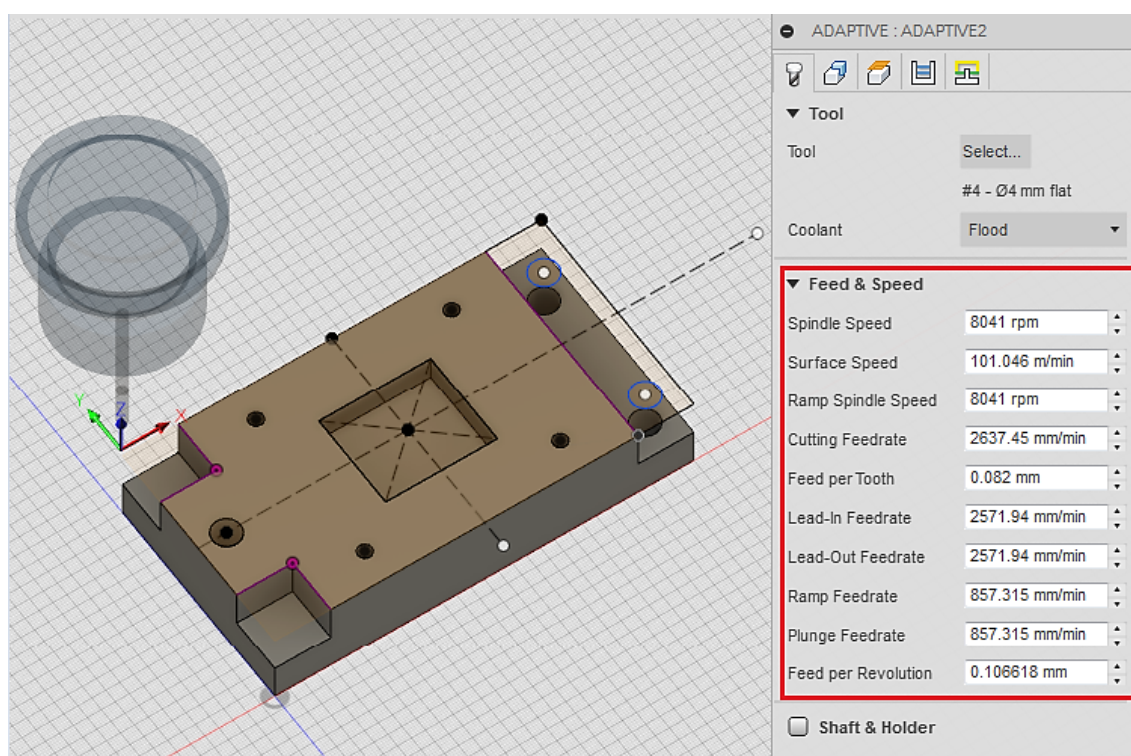
Com os seguintes parâmetros:

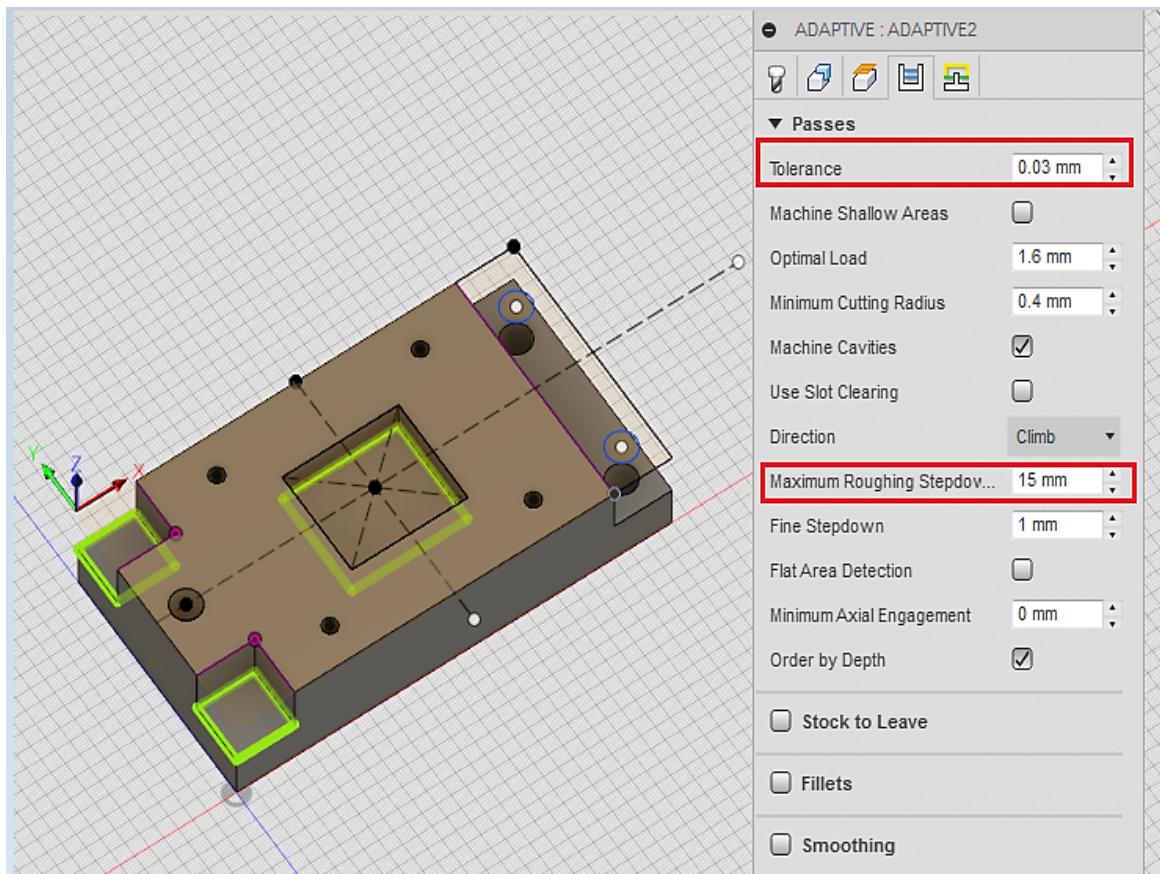


O passo seguinte serve para garantir o acabamento dos cantos e caixas internas assim com um raio de canto de 2 mm.

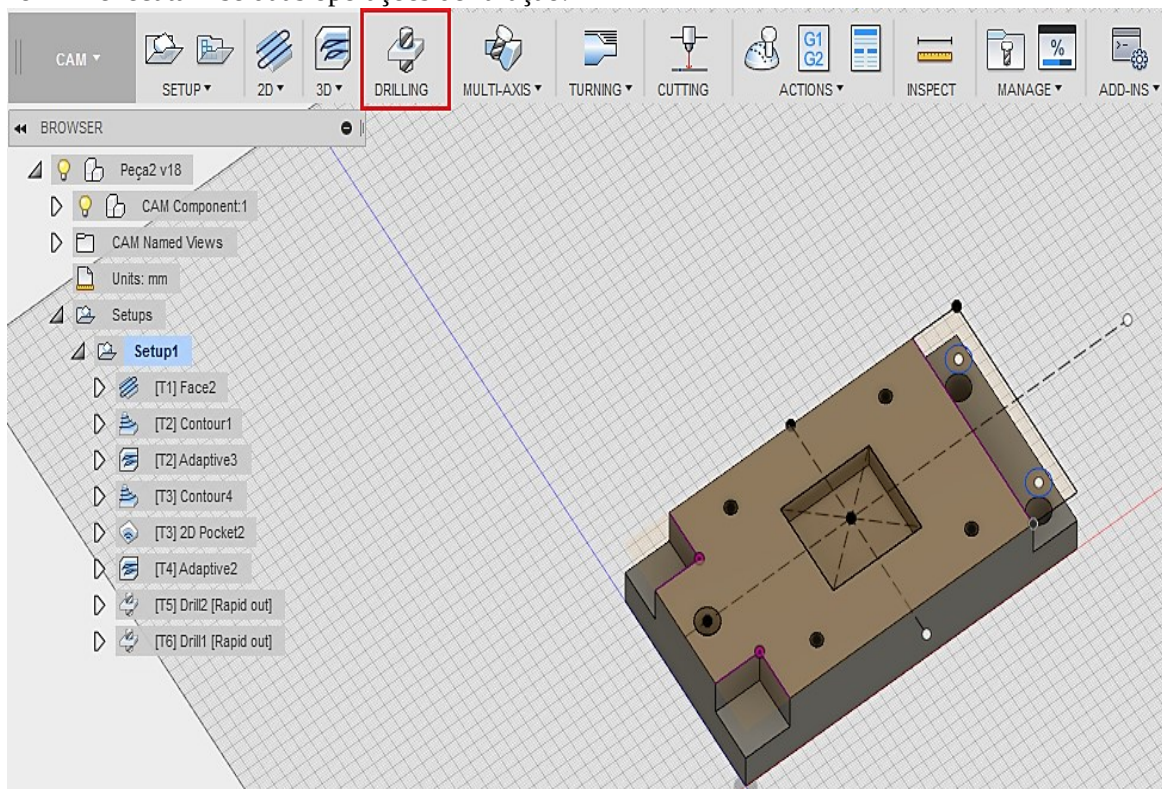


Os parâmetros de corte para esta operação são:





Por fim executam-se duas operações de furação:



Em que os parâmetros de corte são os seguintes:

